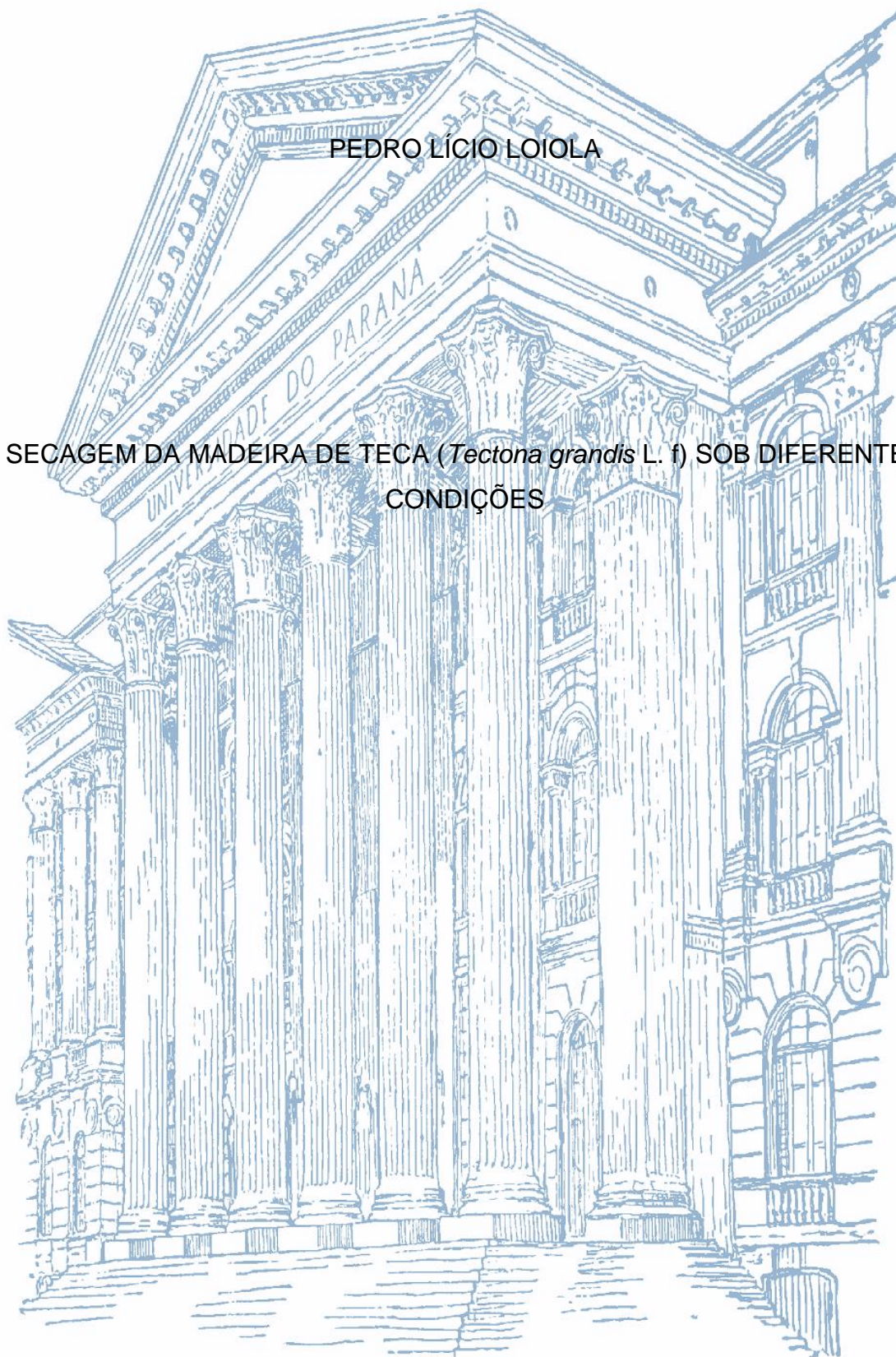


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PEDRO LÍCIO LOIOLA

SECAGEM DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis* L. f) SOB DIFERENTES  
CONDIÇÕES



CURITIBA

2015

PEDRO LÍCIO LOIOLA

SECAGEM DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis* L. f) SOB DIFERENTES  
CONDIÇÕES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Jorge Klitzke

Coorientador: Prof. Dr. Márcio Pereira da Rocha

CURITIBA  
2015

Ficha catalográfica elaborada pela  
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Loiola, Pedro Lício

Secagem da madeira de Teca (*Tectona grandis* L. F) sob diferentes condições. / Pedro Lício Loiola. – Curitiba, 2015.

219 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Jorge Klitzke

Coorientador: Prof. Dr. Márcio Pereira da Rocha

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 06/03/2015.

Área de concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais

1. Madeira – Secagem. 2. Teca (Árvore). 3. Teses. I. Klitzke, Ricardo Jorge. II. Rocha, Márcio Pereira da. III. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. IV. Título.


CDD – 634.9

CDU – 634.0.847

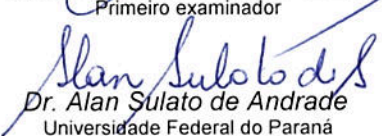
**PARECER**

Defesa nº. 1102

A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após arguir o(a) mestrando(a) *Pedro Lício Loiola* em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado "**SECAGEM DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis* L. f) SOB DIFERENTES CONDIÇÕES**", é de parecer favorável à APROVAÇÃO do(a) acadêmico(a), habilitando-o(a) ao título de *Mestre* em Engenharia Florestal, área de concentração em TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS.



Dr. Elias Taylor Durgante Severo  
Universidade Estadual Paulista - UNESP  
Primeiro examinador



Dr. Alan Sulato de Andrade  
Universidade Federal do Paraná  
Segundo examinador



Dr. Ricardo Jorge Klitzke  
Universidade Federal do Paraná  
Orientador e presidente da banca examinadora



Curitiba, 06 de março de 2015.



Antonio Carlos Batista  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

Dedico este trabalho aos meus pais, Aylton da Silva Loiola e Izaura José Monteiro, aos meus irmãos Lucyana Monteiro Loiola e Matheus Monteiro Loyola (*in memoriam*) aos meus avós Luiz José Monteiro e Maria França Pires Monteiro, pelo apoio, incentivo, carinho, amor e por ter acreditado no meu potencial e mesmo em momentos difíceis permitiram que eu continuasse a estudar.



## AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do Paraná e aos professores que contribuíram para a minha formação acadêmica.

Aos meus pais Aylton da Silva Loiola e Izaura José Monteiro e aos meus irmãos Lucyana Monteiro Loiola e Matheus Monteiro Loyola (*in memoriam*) por acreditarem em mim e dado suporte aos meus estudos.

Aos meus avós Luiz José Monteiro e Maria França Pires Monteiro, por todo o apoio e as sabias palavras professadas nos momentos mais oportunos;

Aos meus tios Francisco José Monteiro Neto e Anderson José Monteiro pela educação, amizade, apoio e exemplo de vida.

A Ligia Oliveira, minha eterna namorada, por sempre ter estado ao meu lado apoiando, incentivando e auxiliando.

Aos meus professores orientadores de graduação, Marcos Oliveira de Paula e Juarez Benigno Paes, pela amizade, orientação, incentivo, dedicação e por terem me iniciado nas pesquisas de Tecnologia da Madeira.

Aos professores do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal pelos ensinamentos ao longo deste curso de Pós graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal do Paraná.

Aos amigos e companheiros de república, Ana Paula Donicht Fernandes, Rafael Leite Braz e Rafael Andrade.

A todos os amigos do curso Engenharia Industrial Madeireira e demais graduados, pelo agradável convívio em que tivemos juntos, em especial aos meus amigos Allan Resende Euflosino, Emanuel Araújo, Franco Poletti, Hassan Camil David, Lair David Feuchard, Rafaela Curto e Victor Fassina Brocco.

Ao casal e eternos amigos Eduardo Vargas e Jeane Miranda.

Aos companheiros do Laboratório de Secagem de Madeiras da Universidade Federal do Paraná, que contribuíram para a realização deste trabalho, sem a ajuda de todos não seria possível este momento tão especial em vida: Cláudio Gumane Fracisco Juízo, Raquel Marchesan, Douglas Edson Carvalho, Victor Gonçalves, Linéia Zen, Najla Cristina Cardoso El Ghaz, Emanuel Sakowicz, Belika Yuri Mori e Daniela Lacerda.

Aos amigos e companheiros do Programa de Pós graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal do Paraná, Elder Eloy, Felipe Zatt, Ramiro França, Rafael Azambuja, Vinícius Castro, Suelem Pontes.

Aos amigos e colaboradores dos laboratórios da Universidade Federal do Paraná, Sr. Vitor Daniel Herrera, Sr. Ademir Cavalli, Sr. Gilberto, Mari Torres, Eliane e Gisele Brochini.

A todos deixo meu singelo agradecimento.

Muito Obrigado!

"Sucesso é o resultado da prática constante de fundamentos e ações vencedoras. Não há nada de milagroso no processo, nem sorte envolvida. Amadores aspiram, profissionais trabalham."

Bill Russel



"Because days come and go,  
but my feelings for you are  
forever".

(*in memoriam* Matheus Loyola).



## RESUMO

A *Tectona grandis* Linn. f. (teca) é uma espécie originária do Sudoeste Asiático de rápido crescimento, bem adaptada e que apresenta um grande potencial no mercado nacional e internacional. As propriedades tecnológicas da madeira de teca são adequadas para a produção de produtos de maior valor agregado – PMVA, possuindo elevada estabilidade dimensional, boa durabilidade natural, e de fácil trabalhabilidade. A indústria de transformação, necessita de uma matéria prima com o teor de umidade adequado para o produto final, tornando-se a secagem de madeiras um dos processos mais importantes para a indústria madeireira. Diante disto, este estudo visou fornecer subsídios técnicos do comportamento da madeira de teca na secagem em estufa convencional, focando duas metodologias para o desenvolvimento de programas de secagem, sendo analisada a influência das variáveis (temperatura, potencial de secagem e velocidade de circulação do ar) na taxa de secagem, qualidade da madeira e no consumo de energia elétrica. Portanto, para a construção deste trabalho, foram desenvolvidos três capítulos que abordaram sobre: 1) *Elaboração de programas de secagem para madeiras de teca (Tectona grandis L. f.)*; 2) *Secagem convencional da madeira de teca (Tectona grandis L. f)* e 3) *Secagem drástica da madeira de teca (Tectona grandis L. f) e avaliação do consumo de energia elétrica*. O capítulo 1, teve por objetivo testar duas metodologias para o desenvolvimento de programa de secagem para madeiras de teca. Foram avaliadas as propriedades físicas e químicas da madeira para posteriormente elaborar as curvas de secagem em função das metodologias testadas, as quais, foram baseadas na secagem drástica a 100°C e na massa específica básica da madeira. Os parâmetros de comparação foram a temperatura inicial, final e o potencial de secagem. O Capítulo 2, teve por objetivo avaliar o programa de secagem elaborado para a secagem em câmara convencional da madeira de teca. Sendo utilizadas três velocidades de circulação do ar (1,5; 2,5 e 3,5 m.s<sup>-1</sup>) e potencial de secagem de 2,4. Foram avaliados os parâmetros de taxa de secagem, tempo de secagem, retração da madeira e a qualidade da madeira seca. O capítulo 3 teve por objetivo avaliar o comportamento da madeira de teca em condições de secagem severa em câmara convencional. Sendo avaliados dois potenciais de secagem (3,4 e 4,4) e temperaturas mais elevadas. Os parâmetros de taxa de secagem, tempo de secagem e a qualidade da madeira seca foram avaliados. Também foi analisado a influência da velocidade de circulação do ar abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF), no consumo de energia elétrica pelo ventilador. O programa de secagem elaborado com base na secagem drástica a 100°C mostrou-se satisfatório para a secagem da madeira de teca para produtos que requerem matéria prima de qualidade. As alterações das velocidades de circulação do ar abaixo do PSF das madeiras de teca, influenciaram a taxa de secagem para a remoção da água higroscópica, no entanto, não pode ser considerado como alterações significativas na taxa de secagem geral da madeira.

Palavras-chave: Taxa de secagem. Potencial de secagem. Câmara de secagem convencional. Tensões de secagem. Consumo de energia.

## ABSTRACT

The *Tectona grandis* Linn. f. (teak) is a species native from the Southeast of Asia, with fast growth, well suited and has great potential in the domestic and international market. The technological properties of teak wood are suitable for the production of higher value-added products - HVAP, having high dimensional stability, good natural durability and easy workability. The manufacturing industry, need a raw material with moisture content suitable for the end product, making the drying of woods one of the most important processes for the timber industry. Therefore, this study aimed to provide technical inputs on the behavior of teak wood in klin drying, focusing on two methodologies for the development of drying programs, being analyzed the influence of the variables (temperature, drying potential and the air circulation speed) in the drying rate, wood quality and consumption of electricity. Thus, for the construction of this work, were developed three chapters: 1) *Preparation of drying programs for teak wood (Tectona grandis L. f.)*; 2) *Conventional Drying of teak wood (Tectona grandis L. f.)* and 3) *Drastic drying of teak wood (Tectona grandis L. f.) and evaluation of electric energy consumption*. Chapter 1, aimed to test two methodologies for the developing of drying program for teak wood. Were evaluated the physical and chemical properties of the wood to posteriorly develop the drying curves as a function of the tested methodologies which were based on the drastic drying at 100°C and specific gravity wood. The comparison parameters were the initial and final temperature and the potential drying. Chapter 2, aimed to evaluate the drying program designed for kin drying of teak wood. Being used three speeds of air flow (1.5, 2.5 and 3.5 m.s<sup>-1</sup>) and potential drying of 2.4. Were evaluated the parameters of drying rate, drying time, shrinkage of the timber and the quality of the wood. Chapter 3 aimed to evaluate the behavior of teak wood in severe drying conditions in klin drying. Being evaluated two potential drying (3.4 and 4.4) and higher temperatures. Were evaluated the rate of drying, drying time and quality of the dried wood. It was also analyzed the influence of the velocity of the air flow below the fiber saturation point (FSP), on the electric energy consumption by the fan. The drying program developed with based on the drastic drying at 100°C was satisfactory for the drying of teak wood for products that require high quality raw material. Changes in circulating air velocities below the FSP of teak wood, influenced the rate of drying for removal of the hygroscopic water, however, can not be considered as a significant changes in the overall drying rate of the wood.

Keywords: Drying rate. Potential drying. Klin drying. Drying tensions. Energy consumption.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	ESQUEMA SIMPLIFICADO DO MOVIMENTO DE ÁGUA EM CAPILAR	39
FIGURA 2 -	ESQUEMA DEMONSTRATIVO DO FLUXO DE ÁGUA LIVRE PELAS PONTOAÇÕES, ATÉ ATINGIR A SUPERFÍCIE DE EVAPORAÇÃO	40
FIGURA 3 -	PRINCIPAIS DEFEITOS OCASIONADOS PELA SECAGEM DA MADEIRA	49
FIGURA 4 -	TÁBUAS DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) ALOCADAS NA CÂMARA FRIA A $5 \pm 1$ °C	78
FIGURA 5 -	AMOSTRA PARA REALIZAÇÃO DO PROGRAMA DE SECAGEM	82
FIGURA 6 -	AVALIAÇÃO DAS RACHADURAS INTERNAS	87
FIGURA 7 -	MENSURAÇÃO DO COLAPSO	87
FIGURA 8 -	REGRESSÃO RELACIONANDO A PERDA DE UMIDADE COM O TEMPO DE SECAGEM PARA A MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) PARA A SECAGEM DRÁSTICA A 100°C	96
FIGURA 9 -	TAXA DE SECAGEM DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) EM CADA FASE DA CINÉTICA DE SECAGEM PARA A SECAGEM DRÁSTICA A 100°C	97
FIGURA 10 -	REGRESSÃO RELACIONANDO A PERDA DE UMIDADE COM O TEMPO DE SECAGEM PARA A MADEIRA DE <i>Tectona grandis</i> PARA A SECAGEM COM BASE NA MASSA ESPECÍFICA BÁSICA	105
FIGURA 11 -	TEMPERATURA INICIAL PARA CADA METODOLOGIA EMPREGADA NA ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE SECAGEM PARA A MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> )	109
FIGURA 12 -	UMIDADE INICIAL (%) DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) PARA CADA METODOLOGIA EMPREGADA NA ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE SECAGEM.	111
FIGURA 13 -	TEMPO (HORAS) DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) PARA CADA METODOLOGIA EMPREGADA NA ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE SECAGEM	112
FIGURA 14 -	COMPONENTES DA ESTUFA DE SECAGEM CONVENCIONAL	132
FIGURA 15 -	DISPOSIÇÃO DA MADEIRA NO VAGONETE E DOS PINOS SENSORES NA MADEIRA	133
FIGURA 16 -	TÁBUAS DESTINADAS PARA A SECAGEM EM CÂMARA CONVENCIONAL	134
FIGURA 17 -	AMOSTRAS PARA A AVALIAÇÃO DA SECAGEM DE UMIDADE FINAL (A), GRADIENTE DE UMIDADE (B) E TENSÕES DE SECAGEM (C)	137
FIGURA 18 -	AMOSTRAS PARA A AVALIAÇÃO DAS TENSÕES DE SECAGEM	138

FIGURA 19 -	MENSURAÇÃO DOS DEFEITOS DE EMPENAMENTOS DE ARQUEAMENTO (A), ENCURVAMENTO (B) E ENCANOAMENTO (C)	139
FIGURA 20 -	MENSURAÇÃO DOS DEFEITOS PARA RACHADURAS	140
FIGURA 21 -	VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE INICIAL DAS MADEIRAS DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) SUBMETIDA À SECAGEM EM CÂMARA CONVENCIONAL DE SECAGEM	143
FIGURA 22 -	TEMPO DE SECAGEM DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) EM FUNÇÃO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM AVALIADOS SUBMETIDA À SECAGEM EM CÂMARA CONVENCIONAL DE SECAGEM	144
FIGURA 23 -	MASSA ESPECÍFICA APARENTE A 10% DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) DAS TÁBUAS SECAS EM CÂMARA CONVENCIONAL DE SECAGEM	145
FIGURA 24 -	TENDÊNCIA DA TAXA DE SECAGEM DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) EM FUNÇÃO DA UMIDADE	149
FIGURA 25 -	UMIDADE FINAL DAS MADEIRAS DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) SUBMETIDA À SECAGEM EM CÂMARA CONVENCIONAL DE SECAGEM	152
FIGURA 26 -	TEOR DE UMIDADE DAS SUPERFÍCIES (S1 E S2) E NA REGIÃO CENTRAL DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) APÓS A SECAGEM PARA AS CARGAS 1 (A), 2 (B) E 3 (C)	154
FIGURA 27 -	DEFEITOS DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) APÓS A SECAGEM EM CÂMARA CONVENCIONAL	157
FIGURA 28 -	VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE INICIAL DAS MADEIRAS DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) SUBMETIDA À SECAGEM EM CÂMARA CONVENCIONAL DE SECAGEM	179
FIGURA 29 -	TEMPO DE SECAGEM DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) PARA OS PROGRAMAS COM POTENCIAL DE SECAGEM DE 3,4	180
FIGURA 30 -	TEMPO DE SECAGEM DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) PARA OS PROGRAMAS COM POTENCIAL DE SECAGEM DE 4,4	181
FIGURA 31 -	MASSA ESPECÍFICA APARENTE A 10% DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) DAS TÁBUAS SECAS EM CÂMARA CONVENCIONAL DE SECAGEM	182
FIGURA 32 -	TAXA DE SECAGEM DAS MADEIRAS DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) EM FUNÇÃO DOS POTENCIAIS DE SECAGEM EMPREGADOS	187
FIGURA 33 -	TENDÊNCIA DA TAXA DE SECAGEM DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) EM FUNÇÃO DA UMIDADE, PARA A SECAGEM DRÁSTICA DA MADEIRA EM CÂMARA CONVENCIONAL, TENDO O POTENCIAL DE SECAGEM DE 3,4	188
FIGURA 34 -	TENDÊNCIA DA TAXA DE SECAGEM DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) EM FUNÇÃO DA UMIDADE PARA A SECAGEM DRÁSTICA EM CÂMARA CONVENCIONAL, TENDO POTENCIAL DE SECAGEM DE 4,4	191

FIGURA 35 -	UMIDADE FINAL DAS MADEIRAS DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) SUBMETIDA À SECAGEM EM CÂMARA CONVENCIONAL DE SECAGEM	196
FIGURA 36 -	TEOR DE UMIDADE DAS SUPERFÍCIES (S1 E S2) E NA REGIÃO CENTRAL DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) APÓS A SECAGEM PELOS PROGRAMAS 4 (A), 5 (B), 6 (C)	198
FIGURA 37 -	TEOR DE UMIDADE DAS SUPERFÍCIES (S1 E S2) E NA REGIÃO CENTRAL DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) APÓS A SECAGEM PELOS PROGRAMAS 7 (A), 8 (B), 9 (C)	199
FIGURA 38 -	ARQUEAMENTO DAS MADEIRAS DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) PARA OS DIFERENTES PROGRAMAS DE SECAGEM AVALIADOS	203
FIGURA 39 -	ENCURVAMENTO DAS MADEIRAS DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) PARA OS DIFERENTES PROGRAMAS DE SECAGEM AVALIADOS	205
FIGURA 40 -	CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA PELO VENTILADOR EM CADA FASE DA SECAGEM PARA A MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) PARA OS PROGRAMAS 4; 5 E 6	207
FIGURA 41 -	CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA PELO VENTILADOR EM CADA FASE DA SECAGEM PARA A MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) PARA OS PROGRAMAS 7; 8 E 9	210

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	VARIÁVEIS RELACIONADAS AO ENSAIO DA VELOCIDADE DE SECAGEM ACELERADA	85
TABELA 2 -	EQUAÇÕES PARA DETERMINAR OS PARÂMETROS DA SECAGEM CONVENCIONAL DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> )	85
TABELA 3 -	EQUAÇÕES PARA DETERMINAR OS PARÂMETROS DE TEMPERATURA INICIAL, DEPRESSÃO PSICROMÉTRICA E O POTENCIAL DE SECAGEM	86
TABELA 4 -	SCORE DE DEFEITOS ATRIBUÍDOS AS AMOSTRAS APÓS OS ENSAIOS PARA A ELABORAÇÃO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM	88
TABELA 5 -	MASSA ESPECÍFICA BÁSICA E APARENTE A 12% DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> )	90
TABELA 6 -	RETRAÇÃO PARCIAL (12% DE UMIDADE) E TOTAL DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) E FATOR ANISOTRÓPICO	92
TABELA 7 -	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> )	93
TABELA 8 -	UMIDADE INICIAL, TEMPO DE SECAGEM E TAXA DE SECAGEM DA MADEIRA DE <i>Tectona grandis</i> , PARA A SECAGEM DRÁSTICA A 100°C	95
TABELA 9 -	MODELOS AJUSTADOS PARA A TAXA DE SECAGEM DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) PARA CADA FASE DA CINÉTICA DE SECAGEM PARA A SECAGEM DRÁSTICA A 100 °C	98
TABELA 10 -	TEMPERATURA INICIAL, TEMPERATURA FINAL E POTENCIAL DE SECAGEM PARA MADEIRA DE <i>Tectona grandis</i> PARA A SECAGEM DRÁSTICA A 100°C	100
TABELA 11 -	PARÂMETROS DOS PROGRAMAS DE SECAGEM DISPONÍVEIS NA LITERATURA PARA A MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> )	102
TABELA 12 -	RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) NA SECAGEM DRÁSTICA A 100°C	103
TABELA 13 -	MASSA ESPECÍFICA BÁSICA, UMIDADE INICIAL E TEMPO DE SECAGEM DA MADEIRA DE <i>Tectona grandis</i> , PARA A SECAGEM COM BASE NA MASSA ESPECÍFICA BÁSICA	104
TABELA 14 -	TEMPERATURA INICIAL, DEPRESSÃO PSICROMÉTRICA E POTENCIAL DE SECAGEM PARA A ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE SECAGEM MADEIRA DE <i>Tectona grandis</i> COM BASE NA MASSA ESPECÍFICA BÁSICA	106
TABELA 15 -	RETRAÇÃO TANGENCIAL, RADIAL, AXIAL E VOLUMÉTRICA DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) NA SECAGEM COM BASE NA MASSA ESPECÍFICA BÁSICA DA MADEIRA	107

TABELA 16 -	COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA INICIAL E POTENCIAL DE SECAGEM PARA A MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) PARA ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE SECAGEM ENTRE AS DUAS METODOLOGIAS TESTADAS	108
TABELA 17 -	COMPARAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE INICIAL (%) E TEMPO (HORAS) PARA A SECAGEM PARA A MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) ENTRE AS DUAS METODOLOGIAS EMPREGADAS	111
TABELA 18 -	COMPARAÇÃO DA VOLUMÉTRICA (%) DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) ENTRE AS DUAS METODOLOGIAS EMPREGADAS	113
TABELA 19 -	PROGRAMA DE SECAGEM ELABORADO CONFORME SIMPSON (1996)	113
TABELA 20 -	PROGRAMA DE SECAGEM ELABORADO CONFORME CINIGLIO (1998)	114
TABELA 21 -	PROGRAMA DE SECAGEM ELABORADO	135
TABELA 22 -	FAIXA TEOR DE UMIDADE PARA O CÁLCULO DA TAXA DE SECAGEM	136
TABELA 23 -	TEOR DE UMIDADE INICIAL, TEMPO E MASSA ESPECÍFICA APARENTE A 10% PARA A MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> )	142
TABELA 24 -	TAXA SECAGEM DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) ENTRE OS PROGRAMAS DE SECAGEM AVALIADOS EM FUNÇÃO DO TIPO DE REMOÇÃO DE ÁGUA	146
TABELA 25 -	MODELOS MATEMÁTICOS AJUSTADOS EM FUNÇÃO DA CINÉTICA DA SECAGEM DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) PARA OS PROGRAMAS AVALIADOS	149
TABELA 26 -	RETRAÇÃO DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) EM LARGURA, ESPESSURA, COMPRIMENTO E VOLUMÉTRICO EM FUNÇÃO DAS CARGAS DE SECAGEM AVALIADAS	150
TABELA 27 -	UMIDADE FINAL, GRADIENTE DE UMIDADE E TENSÕES DE SECAGEM PARA A MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) PARA O PROGRAMA DE SECAGEM ELABORADO	152
TABELA 28 -	PROGRAMA DE SECAGEM COM POTENCIAL DE SECAGEM DE 3,4	174
TABELA 29 -	PROGRAMA DE SECAGEM COM POTENCIAL DE SECAGEM DE 4,4	175
TABELA 30 -	PROGRAMAS DE SECAGEM COM ALTERAÇÕES NA VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO DO AR ABAIXO DO PSF PARA AS MADEIRAS DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> )	175
TABELA 31 -	TEOR DE UMIDADE INICIAL, TEMPO E MASSA ESPECÍFICA APARENTE PARA A MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> )	178
TABELA 32 -	TAXA SECAGEM DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) ENTRE OS PROGRAMAS DE SECAGEM AVALIADOS EM FUNÇÃO DO TIPO DE REMOÇÃO DE ÁGUA	183
TABELA 33 -	MODELOS MATEMÁTICOS AJUSTADOS EM FUNÇÃO DA CINÉTICA DA	



	SECAGEM DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) PARA OS PROGRAMAS AVALIADOS COM POTENCIAL DE SECAGEM DE 3,4	190
TABELA 34 -	MODELOS MATEMÁTICOS AJUSTADOS EM FUNÇÃO DA CINÉTICA DA SECAGEM DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) PARA OS PROGRAMAS AVALIADOS COM POTENCIAL DE SECAGEM DE 4,4	193
TABELA 35 -	RETRAÇÃO DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) EM LARGURA, ESPESSURA, COMPRIMENTO E VOLUMÉTRICO EM FUNÇÃO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM AVALIADOS	194
TABELA 36 -	RETRAÇÃO DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) EM LARGURA, ESPESSURA, COMPRIMENTO E VOLUMÉTRICO EM FUNÇÃO DOS POTENCIAIS DE SECAGEM EMPREGADOS	195
TABELA 37 -	RETRAÇÃO DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) EM LARGURA, ESPESSURA, COMPRIMENTO E VOLUMÉTRICO EM FUNÇÃO DOS POTENCIAIS DE SECAGEM EMPREGADOS	197
TABELA 38 -	TENSÕES DE SECAGEM PARA A MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) PARA OS DIFERENTES PROGRAMAS DE SECAGEM AVALIADOS	200
TABELA 39 -	TEMPO DE SECAGEM E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA PELO VENTILADOR PARA A SECAGEM DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) EM FUNÇÃO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM AVALIADOS COM POTENCIAL DE SECAGEM DE 3,4 SUBMETIDA À SECAGEM EM CÂMARA CONVENCIONAL	209
TABELA 40 -	TEMPO DE SECAGEM E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA PELO VENTILADOR PARA A SECAGEM DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) EM FUNÇÃO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM AVALIADOS COM POTENCIAL DE SECAGEM DE 4,4 SUBMETIDA À SECAGEM EM CÂMARA CONVENCIONAL	212
TABELA 41 -	MODELOS MATEMÁTICOS AJUSTADO PARA ESTIMAR O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA PELO VENTILADOR PARA SECAGEM DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> ) EM CÂMARA CONVENCIONAL DE SECAGEM	213

## LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 -	LEI DE HAGEN-POISEUILLE	35
EQUAÇÃO 2 -	TENSÃO CAPILAR	36
EQUAÇÃO 3 -	PRIMEIRA LEI DE FICK	39
EQUAÇÃO 4 -	COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE VAPOR D'ÁGUA NA MADEIRA	40
EQUAÇÃO 5 -	SEGUNDA LEI DE FICK	41
EQUAÇÃO 6 -	VELOCIDADE DE SECAGEM DA CONDIÇÃO VERDE ATÉ O 30%	81
EQUAÇÃO 7 -	VELOCIDADE DE SECAGEM DA CONDIÇÃO VERDE ATÉ 5%	81
EQUAÇÃO 8 -	VELOCIDADE DE SECAGEM DE 30 ATÉ 5% DE UMIDADE	81
EQUAÇÃO 9 -	ESTIMATIVA DA MASSA SECA (0% DE UMIDADE)	82
EQUAÇÃO 10 -	DETERMINAÇÃO DO COLAPSO NA MADEIRA	85
EQUAÇÃO 11 -	RETRAÇÃO DA MADEIRA PARA OS PROGRAMAS DE SECAGEM	86
EQUAÇÃO 12 -	GRADIENTE DE UMIDADE 1	135
EQUAÇÃO 13 -	GRADIENTE DE UMIDADE 2	135
EQUAÇÃO 14 -	RETRAÇÃO DAS MADEIRAS PARA A SECAGEM EM CÂMARA CONVENCIONAL	138

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b>	<b>18</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>20</b>
2.1 OBJETIVO GERAL	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>21</b>
3.1 A MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> L. f)	21
3.1.1 Introdução da madeira de teca no Brasil	21
3.1.2 Aspectos econômicos da madeira de teca no Brasil	23
3.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA	24
3.2.1 Teor de umidade	25
3.2.2 Massa específica aparente	26
3.2.3 Retratabilidade da madeira	27
3.3 PROPRIEDADES QUÍMICAS DA MADEIRA	28
3.4 IMPORTÂNCIA DA SECAGEM DE MADEIRAS	31
3.5 SECAGEM CONVENCIONAL	31
3.6 AMBIENTE DE SECAGEM EM ESTUFA CONVENCIONAL	32
3.6.1 Temperatura de secagem	32
3.6.2 Velocidade de circulação do ar	35
3.6.3 Umidade relativa	37
3.7 FENÔMENOS FÍSICOS DA SECAGEM DE MADEIRAS	37
3.7.1 Movimento de fluido sob forças capilares	37
3.7.2 Movimentos de fluido sob forças de difusão	41
3.7.3 Cinética da secagem	44
3.8 TAXA DE SECAGEM	45
3.9 DEFEITOS DE SECAGEM	48
3.9.1 Rachaduras	49
3.9.2 Empenamentos	50
3.9.3 Colapso	51
3.10 PROGRAMAS DE SECAGEM	52
<b>4. REFERENCIAS</b>	<b>56</b>

## **CAPÍTULO 1 – ELABORAÇÃO DE PROGRAMAS DE SECAGEM PARA MADEIRAS DE TECA (*Tectona grandis* L. f.)**

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>75</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>77</b>
2.1 OBJETIVO GERAL	77
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	77
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>78</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	78
3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DAS MADEIRAS	79
3.2.1 Massa específica básica e aparente	79
3.2.2 Retratibilidade da madeira	79
3.2.3 Caracterização química da madeira	80
3.3 ELABORAÇÃO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM	81
3.3.1 Preparo do material	81
3.3.2 Determinação do teor de umidade inicial	82
3.3.3 Variáveis utilizadas para a elaboração do programa de secagem drástica	83
3.3.3.1 Cálculo da velocidade de secagem	83
3.3.3.2 Parâmetros para elaboração do programa	85
3.3.4 Variáveis utilizadas para a elaboração do programa com base na massa específica básica	86
3.4. ESCORE DE DEFEITOS DOS ENSAIOS PARA A ELABORAÇÃO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM	87
3.5 RETRAÇÃO DA MADEIRA PARA OS PROGRAMAS DE SECAGEM	89
3.6 ANÁLISE E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	89
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>90</b>
4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICA DA MADEIRA DE TECA ( <i>Tectona grandis</i> )	90
4.2 SECAGEM DRÁSTICA A 100 °C	95
4.2.1 Umidade inicial, tempo e velocidade de secagem	95
4.2.2 Parâmetros para a elaboração do programa de secagem	100

4.2.3 Incidência de defeitos na secagem drástica a 100°C	102
4.2.4 Retração volumétrica da madeira na secagem drástica a 100°C	103
4.3 SECAGEM COM BASE NA MASSA ESPECÍFICA BÁSICA DA MADEIRA	104
4.3.1 Massa específica básica, umidade inicial e tempo decorrido	104
4.3.2 Parâmetros para a elaboração do programa de secagem	106
4.3.3 Incidência de defeitos na secagem com base na massa específica básica da madeira	107
4.2.4 Retração volumétrica da madeira na secagem com base na massa específica básica	107
4.4 COMPARAÇÕES ENTRE AS METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM	108
4.5 PROGRAMA SE SECAGEM ELABORADO	113
<b>5. CONCLUSÕES</b>	<b>116</b>
<b>6. REFERENCIAS</b>	<b>117</b>

## **CAPÍTULO 2 – SECAGEM CONVENCIONAL DA MADEIRA DE TECA** **(*Tectona grandis* L. f)**

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>129</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>131</b>
2.1 OBJETIVO GERAL	131
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	131
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>132</b>
3.1 SECAGEM EM CÂMARA CONVENCIONAL	132
3.1.1 Equipamento utilizado	132
3.1.2 Preparação da carga (tábuas, empilhamento e medições)	133
3.1.3 Secagem da madeira a partir do programa elaborado	134
3.2 AVALIAÇÃO DA SECAGEM EM CÂMARA CONVENCIONAL	135
3.2.1 Taxa de secagem	136
3.2.2 Umidade final, gradiente de umidade e tensões de secagem	136
3.2.3 Incidência de defeitos	138
3.3 RETRAÇÃO DA MADEIRA	140
3.4 ANÁLISE E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	141
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>142</b>
4.1 AVALIAÇÃO DO PROGRAMA DE SECAGEM	142
4.1.1 Umidade inicial, tempo de secagem e massa específica aparente da madeira	142
4.1.2 Taxa de secagem	145
4.1.3 Retração da madeira de teca ( <i>Tectona grandis</i> )	150
4.1.4 Umidade final, gradiente de umidade e tensões de secagem	151
4.1.5 Defeitos de secagem	156
4.1.5.1 Rachaduras de topo e de superfície	156
4.1.5.2 Empenamentos	157
4.1.5.3 Colapso	160
<b>5. CONCLUSÕES</b>	<b>162</b>
<b>6. REFERENCIAS</b>	<b>163</b>

**CAPÍTULO 3 - SECAGEM DRÁSTICA DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis* L.  
f) E AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA**

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>171</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>173</b>
2.1 OBJETIVO GERAL	173
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	173
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>174</b>
3.1 SECAGEM DRÁSTICA EM CÂMARA CONVENCIONAL	174
3.1.1 Programa de secagem utilizado	174
3.2 AVALIAÇÃO DA SECAGEM GRÁSTICA EM CÂMARA CONVENCIONAL	176
3.4 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA SECAGEM	176
3.5 ANÁLISE E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	177
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>178</b>
4.1 AVALIAÇÃO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM	178
4.1.1 Umidade inicial, tempo de secagem e massa específica aparente das madeiras	178
4.1.2 Taxa de secagem	183
4.1.3 Retração da madeira de teca ( <i>Tectona grandis</i> )	193
4.1.4 Umidade final, gradiente de umidade e tensões de secagem	195
4.1.5 Defeitos de secagem	201
4.1.5.1 Rachaduras de topo e de superfície	201
4.4.4.2 Arqueamento	202
4.4.4.3 Encurvamento	204
4.4.4.4 Encanoamento	206
4.4.4.5 Colapso	206
<b>5. CONCLUSÕES</b>	<b>214</b>
<b>6. REFERENCIAS</b>	<b>215</b>



## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A *Tectona grandis* Linn. f. (teca) é uma espécie arbórea de grande porte, originária do Sudoeste Asiático, de rápido crescimento, com propriedades desejáveis para a geração de produtos nobres. Possui tronco retilíneo, fácil de cultivar, pouco sujeita a pragas e doenças, além de ser resistente à ocorrência de incêndios florestais.

As propriedades tecnológicas da madeira de teca são de grande potencial para a confecção de produtos de maior valor agregado – PMVA (produção de móveis, esquadrias de alto padrão, embarcações, painéis colados lateralmente e elementos decorativos), possuindo elevada estabilidade dimensional, boa durabilidade natural, e de trabalhabilidade. A madeira possui coloração amarelo pardo tendendo-se para o café escuro, intercaladas por linhas acentuadas ora claras, ora escuras, o que a torna a madeira com um visual chamativo com cortes transversais com os desenhos formados por seus anéis de crescimento e sua coloração (VIEIRA et al., 2002; MORENO; ROQUE, 2006; CRESPO et al., 2008; AMODEI et al., 2010; MOTTA et al., 2013).

No âmbito mundial, os maciços florestais de teca excedem a dois milhões de hectares. Na Ásia, o seu ciclo de rotação é variável de 60 a 100 anos, já os povoamentos nacionais, a previsão do ciclo de corte é de 25 a 30 anos, com obtenção de madeira para serraria de ótima qualidade. (MACEDO et al., 2005). Os primeiros exemplares foram introduzidos no Brasil em 1930, sendo que os plantios em escala comercial deram-se inícios no estado de Mato Grosso, no município de Cárceres, no final da década de 60 e início da década de 70 (SCHUHLIL; PALUDZYSZYN FILHO, 2010). O constante crescimento do emprego da madeira nos segmentos moveleiros e da construção civil têm colocado este produto em destaque na economia nacional. Os resultados apresentados por Ângelo et al. (2009) sugerem a teca um investimento lucrativo aos produtores, e que a maturidade financeira ocorre dos 14 aos 20 anos, dependendo da taxa de juros e do critério econômico empregado na análise.

A indústria de transformação, no entanto, necessita de uma matéria prima com o teor de umidade adequado para o produto final, tornando-se a secagem de madeiras um dos processos mais importantes para a indústria madeireira. Em

função da versatilidade de operação e controle das variáveis envolvidas no processo, a secagem em câmara convencional é a mais utilizada pela indústria, porém, este processo demanda grandes investimentos iniciais e um consumo elevado de energia, resultando em custos de produção mais elevados. O que justifica o grande interesse em se buscar formas eficientes de secar a madeira, tendo os pesquisadores, assim como, o setor industrial, o objetivo de sempre reduzir o teor de umidade o mais rápido possível, sem provocar defeitos que possam afetar o uso final da madeira.

Para a correta remoção de umidade da madeira é imprescindível a compreensão dos fenômenos físicos envolvidos na secagem, dentre eles a transferência de calor, a qual tem por consequência, o fluxo de fluidos, com o movimento de água do centro para a superfície, pelos mecanismos de capilaridade e difusão e da superfície da madeira para o ar pela evaporação. A resistência para a evaporação da água depende do coeficiente convectivo de massa e da difusão no interior da madeira, sendo a velocidade de remoção de umidade, denominada de taxa de secagem.

A taxa ou velocidade de secagem depende tanto dos fatores inerentes ao processo de secagem, (temperatura, umidade relativa, velocidade de circulação do ar entre as pilhas de madeiras e o potencial de secagem) como também, dos fatores intrínsecos à madeira (espécie, anatomia, permeabilidade e constituição química).

Todavia, quando a secagem é realizada de forma adequada é possível reduzir o ciclo deste processo industrial, assim como, minimizar os defeitos gerados pelo movimento de fluidos na madeira, concomitantemente, agregar valor ao produto final.

Sabe-se que a temperatura reduz consideravelmente o tempo de secagem, proporcionando aumentos da taxa de secagem, principalmente, para a remoção da água de difusão, enquanto, a velocidade de circulação do ar, exerce influência significativa na transferência de calor à superfície da madeira, assim como, na transferência da massa de vapor d'água da superfície para o meio secante, aumentando a taxa de remoção da água capilar.

Diante destes aspectos, foi identificado que a influência do potencial de secagem, empregado no processo foi pouco explorada até o momento, uma vez que exerce influência juntamente com a temperatura e velocidade de circulação do ar na transferência de calor do meio secante para a superfície da madeira.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o comportamento da secagem da madeira de teca (*Tectona grandis* L. f.) em câmara convencional, sob diferentes condições de secagem.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar duas metodologias para o desenvolvimento de programas de secagem para madeiras de teca (*Tectona grandis*) e as propriedades físicas e químicas da madeira;

Aplicar o programa de secagem desenvolvido para madeira de teca (*Tectona grandis*) em câmara convencional piloto;

Avaliar a secagem severa da madeira de teca (*Tectona grandis*) em câmara convencional piloto e o consumo de energia elétrica pelo ventilador;

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 A MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis* L. f.)

A teca (*Tectona grandis* L. f) pertence à família botânica Verbenaceae, é uma das cinco espécies do gênero *Tectona*, conforme Schubert (1974), as quais são a *Tectona australis* Hill 1982, *T. hamiltoniana* Wallich 1832, *T. philippinensis* Benthham e Hooker 1876 e a *T. ternifolia* Buchanan 1838 (SCHUHLIL; PALUDZYSZYN FILHO, 2010).

Originária do sudoeste asiático, sua distribuição natural ocorre principalmente na Índia, Burma, Indochina, Mianmar, Tailândia, Laos incluindo a Indonésia, particularmente em Java e foi introduzida em diversos outros países (TSUKAMOTO FILHO et al., 2003; CRESPO et al. 2008; MOYA et al., 2009; UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA FOREST SERVICE, 2010). Em 2004, segundo Bhat; Ma (2004) cerca de um terço, o que correspondia a 8,9 milhões de hectares, das florestas naturais encontravam-se na Índia.

A introdução desta espécie nos demais países do sudoeste asiático ocorreu via Bangladesh, Camboja, Nepal, Paquistão, Japão, Sri Lanka, Taiwan, Vietnã, já no pacífico ocorreu via Austrália, Ilha Fiji, Ilhas no pacífico norte americanas, também na África Oriental no Quênia, Malaui, Somália, Sudão, Tanzânia, Uganda, Zimbábue, África Ocidental em Benim, Gana, Guiné, Costa do Marfim, Nigéria, Senegal, Togo e África do Sul. Bem como, no caribe em Cuba, Honduras, Jamaica, Nicarágua, Panamá, Porto Rico, Antilhas. Na América do Sul desde a Argentina, Brasil, Colômbia, Suriname, Venezuela até a América Central nos países como Belize, Costa Rica e El Salvador (GURMARTINE; GOUDZWAARD, 2010; MOTTA, 2011; ROCHA, 2011).

##### 3.1.1 Introdução da madeira de teca no Brasil

As evidências dos primeiros exemplares de teca no Brasil ocorreram pelo Instituto de Pesquisas Jardim Botânico, do Rio de Janeiro em 1930, há também evidências de exemplares nos hortos da Gávea (RJ) e no município de Rio Claro,

estado de São Paulo (SCHUHLIL; PALUDZYSZYN FILHO, 2010). Em escala comercial, os primeiros maciços florestais de teca, deram-se início no estado de Mato Grosso, no município de Cárceres, no final da década de 60 e início da década de 70, por iniciativa da Empresa Cárceres Florestal S.A. (MATRICARDI, 1989; TSUKAMOTO FILHO et al., 2003; DRESCHER, 2004; DELGADO et al., 2008; INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS – IPF, 2010; MOTTA, 2011). Ainda seguindo a Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (Anuário..., 2014), existe no Brasil uma estimativa da área plantada de teca de 88.270 ha, no ano de 2013, distribuídos entre os Estados do Acre, Amapá, Mato Grosso do Sul, Paraná, Rondônia, São Paulo, Tocantins e, principalmente, Mato Grosso e Pará, tendo um crescimento de 34,88% da área plantada em relação ao ano de 2010.

As propriedades tecnológicas da madeira de teca são desejáveis para a confecção de produtos de maior valor agregado – PMVA (CRESPO et al., 2008), possuindo elevada estabilidade dimensional (MORENO; ROQUE, 2006), boa durabilidade natural (MOTTA et al., 2013), facilidade de tratamentos de acabamentos (AVELINO, 2012), além das características organolépticas da madeira em função de sua coloração amarelo pardo tendendo-se para o café escuro, intercaladas por linhas acentuadas ora claras, ora escuras. Em cortes transversais, os desenhos formados por seus anéis de crescimento juntamente com a sua coloração, a madeira de teca se destaca pela intercalação de cores que possui (VIEIRA et al., 2002; CRESPO et al., 2008; AMODEI et al., 2010).

Ainda segundo a Indústria Brasileira de Árvores IBÁ (Anuário..., 2014), a madeira de teca possui reconhecimento mundial por ter seu emprego em produtos de finalidades decorativas, construções navais, construção civil de fins nobres, assoalhos e *decks*, sendo utilizada também no setor mobiliário, indústria de laminados e adornos em geral.

A madeira de teca possui um alburno estreito e claro, bem distinto do cerne, cuja cor é marrom viva e brilhante. A espécie apresenta massa específica aparente de 0,650 g.cm<sup>-3</sup>, tendo boa resistência a compressão, tração e flexão. (LAMPRECHT, 1990; MOYA et al., 2009; LIMA et al., 2009; MIRANDA et al., 2011).

### 3.1.2 Aspectos econômicos da madeira de teca no Brasil

O preço da madeira de teca em tora e serrada subiu, atingindo valores sem precedentes no ano de 2007. O principal fator associado a esta alta de preços foi a redução da oferta de madeira do sudeste asiático, agravada por aumento das medidas restritivas contra as atividades madeireiras ilegais, principalmente da região amazônica. Outro fator que culminou com a valorização da madeira foram as restrições de importações e reduções de cotas, particularmente da Indonésia. Diante deste cenário, o mercado da madeira de teca em meados de 2007 e 2008 atingiu um platô na medida que as limitações de fornecimento foram paulatinamente balanceadas pelas condições de demanda nos maiores mercados (SCHUHLIL; PALUDZYSZYN FILHO, 2010; LOPES et al., 2014).

Subsequentemente, os preços reduziram em resposta às baixas condições de demanda, as quais, se mostraram ser uma condicionante mais importante do que as limitações de fornecimento por parte dos maiores produtores do sudeste asiático (INTERNATIONAL TROPICAL ORGANIZATION - ITTO, 2009).

Em 2009 houve uma redução considerável dos estoques de madeira consideradas como nobres, por parte dos países sul americanos (SCHUHLIL; PALUDZYSZYN FILHO, 2010), sendo que as atividades madeireiras afetadas por picos de custo de produção e pelas fortes restrições às atividades ilegais. Culminando com a desvalorização da moeda nacional, ocasionada pela crise internacional do ano de 2008, reduzindo a capacidade competitiva dos exportadores, concomitantemente, a demanda no cenário mundial principalmente pelos mercados norte americanos e europeus já haviam reduzidos. Ainda segundo Schuhlil; Paludzyszyn Filho (2010), o ano de 2009, pode ser considerado como o pior ano para o mercado da madeira de *Tectona grandis*.

Apesar destas sazonalidades do mercado de teca nos anos de 2007 a 2009, esta espécie apresenta-se com um potencial para o mercado florestal brasileiro, pelo fato de seu incremento médio anual (IMA) ser superior às outras espécies consideradas como madeiras nobres, em função das condições climáticas e solo, atingindo anualmente 24,0 metros cúbicos por hectare, na região de Cáceres – MT, com ciclo de corte de 30 anos (SHIMIZU et al. 2007). De todos esses trabalhos, emana o consenso de que se trata de uma espécie de potencial e de retorno financeiro aos investidores.

Os resultados de Ângelo et al. (2009) sugerem a teca um investimento lucrativo aos produtores, e que a maturidade financeira ocorre dos 14 aos 20 anos, dependendo da taxa de juros e do critério econômico empregado na análise. O valor da floresta variou de US\$ 4.973,09 a US\$14.059,45 por hectare na idade de 25 anos, dependendo da taxa de remuneração do capital desejada pelo investidor. Estima-se que produção mundial de madeira de teca seja cerca de 3 milhões de m<sup>3</sup>/ano, o que é extremamente baixa pela demanda atual dessa espécie no mercado exterior.

O desenvolvimento do mercado da madeira de teca no âmbito nacional, está inicializando, no entanto, o mercado torna-se potencial, principalmente em substituição às espécies nativas. As ações de introdução da espécie no mercado nacional têm sido pontuais e aleatórias, conduzidas por empresas que normalmente atendem nichos de mercado específico. O importante é que o processo de comercialização da madeira, considere a madeira de teca uma especialidade e não como uma *commodity*, devendo ser vista como madeira para produtos que agregam valor no âmbito de sua comercialização, com produtos diferenciados e não como madeira para escoras e energia.

Neste cenário do mercado de teca no Brasil, torna-se necessária uma reflexão cuidadosa do panorama com vistas à avaliação e planejamentos de futuros empreendimentos. Esta reflexão deve ser cautelosa e precisa para avaliar a oportunidade do empreendimento e as complexas relações de mercado que circunscrevem, contrapondo os riscos com a falta de informação e suporte técnico. Priorizando as melhores procedências para as diferentes situações edafo-climáticas, com desenvolvimento de protocolos silviculturais adequados e um zoneamento que norteie a expansão consciente da atividade para o cenário nacional.

### 3.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA

As propriedades físicas da madeira fornecem informações relevantes, quanto ao melhor emprego da madeira, nos diversos segmentos da cadeia produtiva de base florestal (OLIVEIRA, 2007). Szücs et al. (2006) ainda complementam que ao empregar a madeira como material de construção, além das propriedades físicas



(umidade, massa específica e retratibilidade) as propriedades ignífugas, durabilidade natural e as propriedades químicas da madeira, devem ser levadas em consideração.

A determinação das propriedades físicas da madeira, são preconizadas por meio de ensaios padronizados executados em amostras criteriosamente selecionadas em lotes de madeira de forma representativa (AGOSTINI, 2005). Existem na literatura diversas normas para a realização destes ensaios, as quais, são mais ou menos empregados em função dos ensaios a serem realizados. Dentre as mais utilizadas pelos institutos de pesquisa podemos citar a norma americana ASTM (American Society for Testing Materials), além da norma britânica BSI (British Standard Institution), juntamente com as preconizadas pela ISO (International Organization for Standardization). No continente americano utiliza-se muito as recomendações da COPANT (Comisión Panamericana de Normas Técnicas). No Brasil existe uma associação de normas técnicas a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) que padroniza os ensaios laboratoriais a serem realizados no País.

### **3.2.1 Teor de umidade**

A umidade da madeira na árvore pode variar de 31 a 213% no cerne e de 40 a 249% no alburno dependendo da espécie (OLIVEIRA et al., 2005; KLITZKE, 2007; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). Calil Junior et al. (2000) mencionam que o teor de umidade da madeira é facilmente compreendido quando se relaciona os aspectos referentes à fisiologia do vegetal, dentre os aspectos da absorção de água e sais minerais do solo pelas raízes até as folhas (seiva bruta) e das folhas até as raízes (seiva elaborada) composta por água e substâncias produzidas pela fotossíntese.

Pelo fato da madeira compreender valores de umidade acima de 100%, a sua determinação se processa pela razão da diferença de massas úmidas e secas, respectivamente, pela massa seca (OLIVEIRA, 2007), no entanto, a indústria de celulose e papel utiliza-se como padrão base úmida (ANDRADE, 2010).

Oliveira et al. (1990) avaliando madeiras *Xylopia sericea* encontrou um teor de umidade máximo para esta espécie de 74%, com grandes variações no sentido medula a casca, assim como, ao longo do tronco. Silveira et al. (2013) realizando

estudos com madeiras da região amazônica, encontrou teor de umidade desde 45,56% para madeiras de *Mezilaurus itauba*, até valores de umidades de 114,13% para madeiras de *Parkia paraenses*.

A característica anatômica exerce influência significativa no teor de umidade máximo da madeira, espécies que apresentam paredes celulares espessas, consequentemente, lumens celulares delgados, apresentam menos espaços nas cavidades celulares, concomitantemente, menores são os teores de umidades destas espécies. Outra característica intrínseca à espécie que afetam o teor de umidade da madeira, são os extrativos, pelo fato de estarem ligados à parede celular, e em muitos casos são compostos apolares, assim como, a lignina cujo, componente químico mais hidrofóbico do que a celulose e as hemiceluloses (STAMM, 1964).

### **3.2.2 Massa específica aparente**

A massa específica aparente é uma das propriedades físicas que mais fornece informações sobre as características da madeira (TREVISAN et al., 2008; LOPES et al., 2011). Para Panshin; De Zeeuw (1980), ela resulta da interação entre suas propriedades químicas e anatômicas, varia em função de diferenças nas dimensões celulares, interações entre estes fatores e pelo teor de extrativos por unidade de volume no lenho. Além disso, a presença de substâncias minerais como cristais de oxalato de cálcio e sílica em algumas espécies favorecem para o aumento da massa específica da madeira.

Existe uma amplitude imensa quanto aos valores de massa específica entre as madeiras, variando de valores próximos a 0,20 g/cm<sup>3</sup> até 1,40 g/cm<sup>3</sup>. Tal variação ocorre em função das diversas influências externas e internas que configuram a organização e dimensões das células do lenho (KOLLMANN; CÔTÉ JUNIOR (1968); KLITZKE, 2007). A principal causa desta variação de massa específica está relacionada com a característica da espécie, teor de umidade da madeira, presença de lenho inicial ou tardio, largura dos anéis de crescimento, sítio de crescimento da árvore e tratos silviculturais (TRIANOSKI et al., 2013).

As características de retratibilidade, trabalhabilidade, impregnabilidade, durabilidade natural e as propriedades mecânicas estão correlacionadas com a

massa específica da madeira, servindo na prática como uma referência para a classificação da madeira (GONÇALVES et al., 2009).

### **3.2.3 Retratibilidade da madeira**

A madeira por ser um material higroscópico sofre alterações em suas dimensões caracterizando a adsorção ou a desorção da água higroscópica localizada nas paredes celulares. Praticamente toda a alteração dimensional da madeira ocorre entre o ponto de saturação das fibras – PSF até 0% de umidade (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985). Sendo considerada uma das propriedades físicas mais importantes, afetando e limitando de forma considerável o emprego e utilização de espécies de madeiras em aplicações onde a estabilidade dimensional seja fator importante. Galvão; Jankowsky (1985) citaram que o aumento do volume é proporcional à variação de umidade (0% até PSF), como também, diretamente relacionada à massa específica da madeira. No entanto, espécies que contenham grandes quantidades de resinas, de extrativos e de lignina são menos susceptíveis a estas alterações volumétricas.

O fenômeno de adsorção (inchamento) ocorre principalmente pela inclusão de moléculas de água nos espaços submicroscópicos, entre as micelas, que são feixes formados por moléculas de celulose, e nas regiões amorfas de celulose e hemiceluloses, afastando-as, ocasionando assim, a alteração volumétrica da madeira. Desta mesma forma, o fenômeno de desorção (contração) é caracterizado pela excreção de água dos espaços submicroscópicos mencionados, ocasionando a aproximação das micelas e das moléculas que as constituem, conseqüentemente ocorrendo alteração volumétrica da madeira (SKAAR, 1988; GOMES et al., 2006).

Stamm (1964) afirmou que existe correlação entre a variação volumétrica da madeira com a sua massa específica básica. No entanto, Gomes et al. (2006), citaram que esta relação pode ser inadequada para espécies que apresentam quantidades elevadas de extrativos, o qual, ficam impregnados nos espaços da parede celular, reduzindo as alterações dimensionais da madeira. Outra forma de alterar esta relação são as variações ocorridas nas fibrilas e na espessura relativa das várias camadas que compõem a parede celular. A massa específica é a característica mais utilizada para prever a contração volumétrica e as características de secagem das madeiras.

Por causa de seu caráter anisotrópico, as variações dimensionais na madeira ocorrem distintamente na direção radial, tangencial e longitudinal. A variação longitudinal, às vezes, é menor que 1%. Desta forma é importante a determinação da retratibilidade volumétrica total e das variações dimensionais lineares. A movimentação na direção transversal requer maior atenção, pois ela se diferencia conforme a direção tangencial ou radial, com as maiores movimentações na direção tangencial (TRIANOSKI et al., 2013).

Segundo Marques et al. (2012) a relação entre os valores das contrações no sentido tangencial e radial que determina o coeficiente de anisotropia (T/R), possibilita prever o comportamento da madeira em relação à secagem, indicando uma maior ou menor propensão de defeitos de empenamentos ocasionados pela secagem. A determinação do coeficiente de anisotropia ocorre em função da mensuração das medidas lineares nos diferentes planos anatômicos da madeira, estando esta, com teor de umidade acima do PSF até uma condição de secagem completa (GOMES et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2010).

### 3.3 PROPRIEDADES QUÍMICAS DA MADEIRA

Na análise química elementar da madeira não há diferenças significativas em relação à diversidade de espécies florestais segundo (PENEDO, 1980; KLOCK et al., 2005; WASTOWSKI, 2009).

Os principais elementos existentes na madeira são o carbono (C) com aproximadamente 50% em sua composição, o hidrogênio (H) este com 6% e o oxigênio (O) com 44%. Além destes elementos encontram-se em pequenas quantidades o cálcio (Ca), potássio (K) e magnésio (Mg), constituindo as substâncias minerais existentes na madeira (KLOCK et al., 2005).

Quimicamente, a madeira é definida segundo, Farmer (1967); Lepage (1986); Rowell et al., (2005) como um biopolímero tridimensional, formado por celulose, hemicelulose, lignina, e em menor quantidade extrativos e materiais inorgânicos (cinzas).

De acordo com Lepage (1986), a celulose é um polímero constituído por cadeias lineares de unidades monoméricas de 1 - 4  $\beta$  glicopirranose de alto peso

molecular, não-solúvel em água, sendo o composto químico mais abundante no planeta, trata-se do componente fundamental da estrutura celular da madeira.

Apresenta cadeia longa e sem ramificações, caracterizando-se por regiões cristalinas em grande parte de seu comprimento, entrecortadas por zonas amorfas (SILVA, 2007).

Siau (1986) cita que aproximadamente um terço do volume de celulose amorfa é capaz de adsorver moléculas de água resultando em inchamento lateral. O menor elemento constituinte do esqueleto celulósico é considerado, por diversos autores Kollmann (1959); Kollmann; Côté Junior (1968); Lepage (1986), como sendo uma fibrila elementar. Esta fibrila é formada por um feixe paralelo de 36 moléculas de celulose ligadas entre si por meio de pontes de hidrogênio. A união das fibrilas elementares origina as microfibrilas e estas formam as macrofibrilas que, por fim, origina a fibra de celulose.

A justaposição das cadeias de celulose não é contínua. Hellmeister (1973) ao realizar análises, com raios-X, reconheceu e mediu regiões que apresentavam inúmeras cadeias de celulose alinhadas e interligadas. Essas regiões, denominadas "cristalitos" ou micelas, correspondem às microfibrilas observadas ao microscópio eletrônico.

As hemiceluloses são polissacarídeos associadas à celulose e à lignina em tecidos vegetais. Enquanto a celulose é formada pela repetição da mesma unidade monomérica, nas hemiceluloses aparecem condensadas diversas dessas unidades (LEPAGE, 1986; CALIL et al., 2003). Além de atuar como uma "matriz" na qual estão imersas as cadeias de celulose, as hemiceluloses são componentes bastantes higroscópicos e atraem moléculas de água das paredes celulares. A associação de um grupo de cadeias de celulose "envolvidas" por moléculas de hemicelulose pode ser chamada de microfibrila.

A cadeia principal de uma poliose pode ser constituída por uma única unidade (homopolímero) como, por exemplo, xilanas, ou por duas ou mais unidades (heteropolímeros) a exemplo, glucamonas. Algumas das unidades são sempre ou algumas vezes grupos laterais da cadeia principal como a galactose, ácido o-metil glicouronico (BROWNING, 1963; LEPAGE, 1986).

As ligninas são polímeros tridimensionais constituídos de unidades de fenilpropano, apresentando composições diferentes para coníferas e folhosas. Elas incrustam o espaço intercelular e qualquer abertura na parede celular, após a

formação da celulose e das hemiceluloses. São consideradas como um material incrustante em torno das microfibrilas, conferindo rigidez às paredes celulares dos elementos anatômicos, tornando-se resistentes a solicitações mecânicas (FENGEL; WEGENER, 1984; LEPAGE, 1986).

A lignina é um produto de polimerização dos álcoois p-cumárico, coniferílico e sinapílico, precursores que sofrem uma dehidrogenação enzimática, dando origem a radicais fenoxi (LEPAGE, 1986).

A lignina das folhosas possui unidades do tipo guaiacil e do tipo siringil, de tal forma que é considerada um copolímero dos álcoois sinapílico e coniferílico em proporções que variam conforme a espécie. A proporção de ligações do tipo  $\beta$ -aril éter é maior nas folhosas que nas coníferas (FREUDEMBERG, 1968; LEPAGE, 1986).

Em função da presença de um radical adicional metoxila nas unidades do tipo siringil, a lignina das folhosas é muito menos condensada do que a lignina das coníferas (LEPAGE, 1986).

Em adição aos seus componentes majoritários (celulose, hemicelulose e lignina), a madeira contém produtos extraíveis em água e, ou solventes orgânicos, denominados extrativos, além dos chamados componentes estranhos (proteínas e substâncias pécticas) que são insolúveis e encontrados principalmente nas cinzas da madeira (ROWELL, 1984; LEPAGE, 1986).

Sobre esses compostos, poucas generalizações podem ser feitas, mas sua importância advém da influência que tem sobre algumas propriedades da madeira em que ocorrem. São encontrados principalmente no cerne de todas as espécies, embora pequenas quantidades possam ocorrer no alburno (OLIVEIRA, 2007).

A cor da madeira, o cheiro, bem como, sua durabilidade natural são propriedades que dependem da presença de extrativos. Em muitas espécies, as maiores quantidades de extrativos são encontradas no cerne, em sua região fronteira com o alburno, diminuindo em direção à medula. Este é um dos fatores que contribui para a discrepância dos resultados de ensaios sobre a durabilidade natural da madeira, principalmente quando a amostragem é negligenciada (FINDLAY, 1985).

### 3.4 IMPORTÂNCIA DA SECAGEM DE MADEIRAS

A utilização da madeira em manufaturas de produtos com melhor padrão de qualidade e maior valor agregado, requer uma matéria prima que esteja com um teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras - PSF (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985), o qual é difundido na literatura (KOLLMANN; CÔTE JUNIOR, 1968; MADSEN, 1992; LOSGDON; CALIL, 2002; BELTRAME et. al., 2010) que as propriedades mecânicas da madeira são diretamente afetadas pelo teor de umidade.

Além dos benefícios ocasionados pela secagem quanto às propriedades mecânicas da madeira, a secagem tem como consequência também, o aumento da resistência ao ataque por organismos xilófagos (FINDLAY, 1985; PAES et al., 2007; MOTTA et al., 2013), proporciona melhorias quanto a estabilidade dimensional da madeira (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985; GOMES et al., 2006), o qual reduz a movimentação dimensional em sua solicitação de serviço. Quanto à aplicação de acabamentos, os quais devem ser utilizados com a madeira em seu estado seco, onde proporciona melhores qualidades de fixação, abrasividade, dureza, brilho e aderência (LIMA et al., 2002). A secagem ainda ocasiona reduções consideráveis nos custos de transporte, em função da redução de massa ocasionada (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985; KLITZKE, 2007).

### 3.5 SECAGEM CONVENCIONAL

A secagem convencional é o método de secagem de madeiras, em que possibilita maior flexibilidade de controle das variáveis envolvidas no processo como a temperatura, velocidade de circulação do ar, umidade relativa e potencial de secagem. A amplitude de temperatura operada por este tipo de estufas está em função do tipo de madeira a ser seca, qualidade da madeira seca, compreendendo valores de 40 a 100 °C (HILDEBRAND, 1970; MARTINS, 1988; SIMPSON, 1991; JANKOWSKY, 1995). Em função das perdas de calor e deficiências na sua transferência ocasionada pelo processo, Santini (1996); Jankowsky et al. (2003);



Almeida (2011); Susin (2012) enfatizam a limitação da temperatura máxima compreendendo entre 80 a 90 °C.

Segundo Jankowsky, (1995); Santini (1996); Batista (2009), o funcionamento da estufa considera a circulação do ar promovida por um conjunto de ventiladores reversíveis que impulsionam esse ar, e que após se aquecer ao passar pelos trocadores de calor, é orientado para atravessar as pilhas de madeira transferindo calor para a madeira e a umidade de superfície das peças para o ambiente.

Em estufas convencionais o ar circula a uma velocidade entre 2 e 5 m/s, e o número de ventiladores deve ser suficiente para possibilitar uma distribuição uniforme do mesmo. Embora o vapor produzido por caldeiras seja a fonte de calor mais comum nas estufas convencionais, sistemas de aquecimento elétricos e trocadores de calor com água quente e óleo, também podem ser utilizados (HILDEBRAND, 1970; KLITZKE, 2002).

A umidificação do ar é obtida pela liberação de vapor de baixa pressão ou por válvulas de aspersão de água fria ou quente no interior da estufa, e por um sistema de renovação do ar, os quais são denominados de *dumpers* (PRATT, 1974).

As principais restrições da secagem convencional estão ligadas ao investimento inicial e à necessidade de mão de obra especializada. Os investimentos não são somente aqueles diretamente relacionados à compra da estufa, pois, um setor de secagem convencional necessita ainda de caldeiras, instalações hidráulicas, elétricas, rede de vapor e barracões que em seu conjunto acabam elevando o custo e restringindo a implantação do sistema (STCP, 1990; ALMEIDA, 2011).

### 3.6 AMBIENTE DE SECAGEM EM ESTUFA CONVENCIONAL

#### 3.6.1 Temperatura de secagem

A temperatura na secagem de madeira exerce influência na velocidade de secagem, pois, quanto maior a temperatura, maior será a taxa de evaporação de umidade da madeira e também na umidade relativa do ar no interior da estufa (SEVERO, 1989; KLITZKE, 2007). No entanto, por definição, temperatura é uma

grandeza física empregada para determinar o grau de agitação ou a energia cinética das moléculas de uma determinada quantidade de matéria. Esta energia cinética das moléculas é fornecida na forma de calor, o qual corresponde a energia em transito que se transfere de um corpo ao outro pela diferença de temperatura (INCROPERA et al., 2008).

Em estufas convencionais de secagem, a transferência de calor, ocorre sob duas formas (KLITZKE, 2007; MELLADO, 2007), por convecção forçada (condução de calor através da camada limite) e por condução (condução de calor na madeira). Ainda segundo Incropera et al., (2008); Cremasco, (2009) a transferência de calor por convecção envolve dois mecanismos de condução de calor. O primeiro mecanismo de energia seria por causa do movimento molecular aleatório (difusão) e o segundo mecanismo pela energia transferida por meio do movimento global, ou macroscópico do fluido, sendo representado por números adimensionais como Prandtl, Reynolds e Schmidt. Keey et al. (2000) ainda complementa que a evaporação superficial de umidade é determinada pela transferência convectiva de calor entre o ar e as superfícies expostas da madeira, sendo proporcional à diferença entre a temperatura superficial da madeira e a temperatura do ar, além de um coeficiente convectivo de calor que varia com a geometria da superfície e com a velocidade de circulação do ar.

Já a condução de calor pela madeira, segue os princípios dos números adimensionais de Fourier e Biot. Cujo qual, é uma medida da razão entre as taxas de condução de calor e a de retenção de calor em um elemento de volume. Por isto, quanto maior o número de Fourier, mais profunda é a penetração do calor em um sólido durante certo intervalo de tempo (INCROPERA et al., 2008; CREMASCO, 2009). Em que também segue o princípio da resistência térmica dentro de um corpo sólido e corresponde à razão entre as resistências interna e externa ao transporte de calor. Portanto, quanto maior o número de Biot, menor será a temperatura no interior da madeira. A transferência de calor por condução na madeira é influenciada pelas propriedades termofísicas da madeira de condutividade térmica, calor específico e pela difusividade térmica, as quais, são afetadas pela massa específica da madeira, teor de umidade, teor de extrativos, direção da grã e pelas características estruturais como: nós e ângulo microfibrilar (KOLLMANN; CÔTE JUNIOR, 1968; SIMPSON, 1991; MELLADO, 2007).

A secagem de madeira ocorre sob o efeito do gradiente de umidade do interior para a superfície da madeira, mantendo-se constante a temperatura ao longo da secagem a taxa de evaporação da umidade da superfície da madeira irá reduzir de forma gradual à medida que o teor de umidade da madeira diminui, concomitantemente, ocorre o aumento da pressão de vapor do ar (KOLLMANN; CÔTE JUNIOR, 1968; KLITZKE, 2002). Portanto, em programas de secagem a elevação da temperatura ao longo da secagem deve ocorrer de forma gradual, proporcionando sempre a taxa de evaporação da umidade.

O gradiente de temperatura utilizado na secagem deve ser empregado além da qualidade do processo de secagem, como também, em função das características da madeira a ser seca. Klitzke (2002; 2007), enfatizou que madeiras de folhosas e refratárias, quando submetidas a elevadas temperaturas de secagem apresentam muitos defeitos. Schaffer (1973); Figueroa; Moraes (2009), ressaltam que o gradiente térmico, promove a degradação térmica dos constituintes químicos da madeira, sendo que a 55 °C a estrutura natural da lignina sofre alterações em função da quebra de ligações e a hemicelulose inicia-se o processo de amolecimento. Em secagem a altas temperaturas, acima de 110 °C a lignina começa a perder massa, portanto deve-se observar certos limites de temperatura para que não ocorra a degradação térmica da madeira.

Santini (1980) avaliando a influência da temperatura na taxa de secagem da madeira de *Pinus elliotti* demonstrou que a taxa de secagem aumenta de forma linear com a temperatura, sendo que para a temperatura de 60 a 180 °C ocorreu um aumento da taxa de secagem na ordem 10 vezes para a espécie estudada. Outro estudo realizado por Santini (2000) o qual, avalia temperatura da madeira como alternativa de controle do processo de secagem, em que utilizou quatro temperaturas de secagem, também constatou que a velocidade de secagem aumenta de forma proporcional com a temperatura utilizada. Calegari et al. (2007), submetendo as madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliotti* a três temperaturas distintas de secagem, encontrou para as maiores temperaturas maiores taxa de secagem, assim como, as maiores temperaturas proporcionaram as menores umidades de equilíbrio para as espécies estudadas, em função da decomposição das hemiceluloses que são os constituintes químicos mais hidrofílicos da madeira. Durlo (1991) também encontrou menores umidades de equilíbrio para a madeira de *Pinus*

*elliotti* para as maiores temperaturas de secagem utilizadas, fato este também observado por Oliveira et al. (2003).

### **3.6.2 Velocidade de circulação do ar**

O fluxo de ar no processo de secagem de madeira tem por finalidade realizar a transferência de calor para a superfície da madeira e realizar a transferência de massa de vapor de água da superfície para o ar secante (HILDEBRAND, 1970; MACKAY; OLIVEIRA, 1989; KLITZKE, 2002).

O sistema de circulação de ar em estufa convencional, está diretamente relacionado ao consumo de energia elétrica demanda para realizar o funcionamento dos motores (KLITZKE, 2002) por isto foi amplamente estudado (TOMASELLI, 1977; SALAMON, MCLNTYRE 1969; WENGERT; DENIG, 1995; KLITZKE, 2002), visando a otimização da velocidade de circulação do ar em função dos fenômenos físicos de difusão e capilaridade no processo de secagem de madeira. No entanto, as alterações de velocidade de circulação de ar nas estufas, só eram possíveis com modificações da área de passagem do ar pelas pilhas, o que inviabilizava o processo. Atualmente com a utilização dos inversores de frequência (RAYMOND, 2001; KLITZKE, 2002) tornou-se possíveis alterações das velocidades de circulação de ar pelas pilhas reduzindo o consumo de energia elétrica, conseqüentemente, os custos industriais.

Tomaselli (1977); Klitzke (2002; 2007) relataram que no decorrer da secagem nas regiões próximas a superfície da madeira forma-se um escoamento em regime laminar (camada de ar estagnante) o qual atua como uma camada isolante retardando a evaporação e a transferência de calor. Portanto, quanto maior o escoamento em regime turbulento maior será a transferência de calor. Esta formação da camada de ar estagnante, ocorre ao utilizar baixas velocidades de circulação de ar, havendo somente troca de quantidade de movimento molecular (WHITE, 2002). Qualquer tendência para instabilidade e turbulência é atenuada por forças viscosas de cisalhamento que dificultam o movimento relativo entre as camadas adjacentes do fluxo de ar. A casos em que o regime laminar, torna-se um escoamento permanente, onde a pressão exercida pelo fluido em um determinado ponto não varia no espaço, contribuindo para que o processo de transferência de calor entre a superfície da madeira e o ar secante seja reduzido (BRUNETTI, 2008).

Já em velocidades maiores, com o regime de escoamento turbulento, no qual, as partículas apresentam movimento caótico macroscópico, isto é, a velocidade apresenta componentes transversais ao movimento geral do conjunto ao fluido. O escoamento turbulento, são os que mais ocorrem entre as camadas de madeira e proporcionam as maiores trocas de calor entre a superfície da madeira e o ar secante. Outro fator para sempre proporcionar este tipo de regime em estufas convencionais de secagem, é pelo fato deste regime de escoamento ser acompanhado pelo escoamento não permanente, em que, a pressão exercida pelo ar torna-se variável no tempo e no espaço, contribuindo para as trocas de calor entre a superfície da madeira e a ar secante (WHITE, 2002; BRUNETTI, 2008).

É difundido na literatura (KOLLMANN; SHENEIDER, 1961; TOMASELLI, 1977; SEVERO, 1989; WENGERT; DENIG, 1995; KLITZKE, 2002) que a velocidade de circulação do ar exerce influência mais pronunciada nos estágios iniciais da secagem, onde a taxa de secagem é constante e à medida que a umidade vai se aproximando do PSF, vai decrescendo continuamente a importância da velocidade de circulação do ar, em função do movimento de fluido que ocorre na madeira abaixo do PSF sendo ocorrido pelo fenômeno físico de difusão.

Wengert; Denig (1995) relataram que velocidades levemente superiores nos estágios iniciais de secagem em estufa convencional, principalmente nas fases de aquecimento e quando o conteúdo de umidade estiver elevado, onde velocidade de circulação do ar resultam em uma taxa de secagem superior. Carter; Sprague (1989) ainda complementam que baixas velocidades de circulação de ar, ocasiona uma elevação da temperatura do termômetro do bulbo úmido, consequentemente, os *dampers* se abrem para que a umidade relativa da estufa esteja seguindo conforme a programação da secagem.

Existem alguns estudos em que realizaram uma combinação de velocidade de circulação do ar em função do teor de umidade da madeira, em que, Salamon; McIntyre (1969) demonstraram de forma satisfatória que para o teor de umidade acima do PSF, utilizando velocidade de circulação do ar em 4,5 m/s e para umidade abaixo do PSF velocidades de 2,5 m/s, houve uma redução do tempo de secagem na ordem de 18% para a madeira de *Tsuga heterophylla*, cerca de 15% para a *Picea engelmanni* e para a *Pseudotsuga mensiesii* a redução do tempo foi cerca de 25%. Klitzke (2002) avaliando madeiras de *Pinus taeda*, em que foi reduzindo a

velocidade de circulação do ar de forma gradativa ao longo da secagem encontrou reduções no tempo de secagem na ordem de 13%.

### 3.6.3 Umidade relativa

A umidade relativa de uma mistura gás vapor é a medida da sua saturação parcial e por definição é a relação entre a pressão parcial de vapor e a pressão de vapor saturado a uma dada temperatura, podendo oscilar de 0 a 100%. A casos especiais em que a umidade relativa ultrapassa o valor de 100%, encontrando o ambiente super saturado. A umidade relativa determina a capacidade de secagem do ar, quanto menor a pressão parcial de vapor no ambiente de secagem, maior será a capacidade do ar em absorver moléculas d'água da superfície da madeira, controlando as tensões de secagem que se desenvolvem em função da movimentação dimensional durante a secagem. (KLITZKE, 2002; ELEOTÉRIO, 2009).

A umidade relativa pode ser alterada realizando modificações na temperatura sem que haja injeção de vapor saturado, em que, aumentando a temperatura do ambiente de secagem, proporciona redução da umidade relativa, assim, aumenta a capacidade do ar em absorver moléculas de vapor d'água (KLITZKE, 2002). Em câmara convencional de secagem é necessário que o ar secante seja sempre renovado, havendo trocas de ar úmido por ar fresco com abertura dos *dampers* (HILDEBRAND, 1970).

## 3.7 FENÔMENOS FÍSICOS DA SECAGEM DE MADEIRAS

### 3.7.1 Movimento de fluido sob forças capilares

A translocação de fluidos na madeira acima do ponto de saturação das fibras é ocasionada por forças capilares, o qual, são regidas pela lei de Hagen-Poiseuille (KOLLMANN; CÔTÈ, 1968; SIAU, 1984; BATISTA, 2008), em que é apresentado pela Equação 1.

$$Q = \frac{\pi * \Delta P * R^4}{8 * \eta * L} \quad (1)$$

Em que:

Q = vazão [cm<sup>3</sup>.cm<sup>-2</sup>];

$\Delta P$  = variação da pressão [dyn.cm<sup>-2</sup>];

R = raio do capilar [cm];

$\eta$  = viscosidade do fluido [ dyn.s.cm<sup>-2</sup>];

L = comprimento do cilindro [cm].

EQUAÇÃO 1 - Lei de Hagen-Poiseuille.

Hart (1965), Kollmann; Côté (1968); Siau (1984); Simpson (1991); Jankowsky (2009), descrevem este fluxo de uma maneira simplificada.

Em um capilar completamente cheio o movimento da água capilar é produzido pelas diferenças existentes de tensão em função de forças existentes na superfície do menisco no interior do capilar. A força de tensão “T” em um menisco balanceado de um capilar com raio “r” pode ser calculado (Equação 2), em que estabelece que a tensão capilar é diretamente proporcional a tensão superficial da interface ar-água e inversamente proporcional ao raio da curvatura. Desconsideram-se neste caso as diferenças na pressão do ar existente dentro do capilar.

$$T = H * \rho = \frac{d\sigma}{\rho * r} * \rho = \frac{2\sigma}{r} \quad (2)$$

Em que:

T = tensão capilar [g/cm<sup>3</sup>];

H = altura de ascensão do líquido no capilar [cm];

$\rho$  = massa específica do líquido [g.cm<sup>-3</sup>];

r = raio do capilar [cm];

$\sigma$  = tensão superficial do líquido [g.cm<sup>-1</sup>].

EQUAÇÃO 2 - Tensão Capilar.

No interior de um tubo capilar há a existência de um menisco balanceado (forma côncava - evaporação) e um menisco na parte oposta não balanceado (forma

quase plana - condensação), conforme Kollmann; Côté (1968); Siau (1984); Severo (1998); Klitzke (2007) o movimento do fluido é proporcionado pelas diferenças da tensão existente entre os dois meniscos (Figura 1).

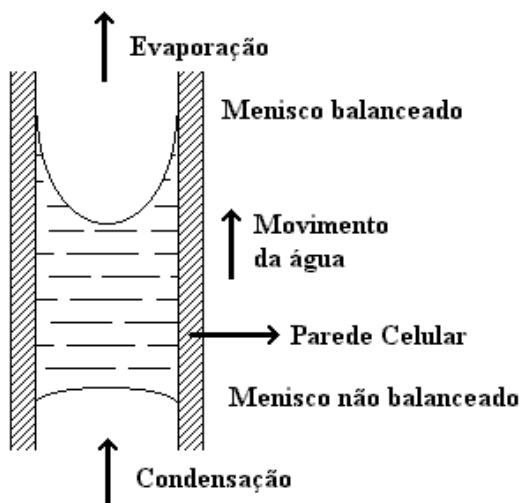


Figura 1 - Esquema simplificado do movimento de água em capilar

Fonte: Batista (2008) modificado, Kollmann; Côté Junior (1968)

Batista (2008) apud Lisboa<sup>1</sup> (1986) explicou de forma satisfatória que, quando a interface ar-água é plana, existe uma maior tendência das moléculas de água, perto da superfície ficarem livres, quando comparada com a tendência de escape na superfície côncava. A tendência de escape das moléculas em virtude da geometria da superfície é explicada pela diferença de pressão ocasionada. Desta forma, a região com menor área oferecerá uma maior pressão, no entanto, a região que apresentar uma maior área, conseqüentemente, menor pressão. Portanto, entende-se que haverá uma força resultante em virtude da diferença de pressão no sentido da região de maior pressão para a região de menor pressão.

Partindo da fundamentação anterior, como a pressão de vapor sobre o menisco balanceado é menor que a pressão de vapor sobre o menisco não balanceado, existe, no entanto, o movimento de água capilar na direção do menisco mais côncavo em função do gradiente de pressão criado pela evaporação na superfície superior e condensação na região inferior (BATISTA, 2008).

<sup>1</sup>LISBÔA, C. D. J. **Escoamento de água na madeira: capilaridade**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1986. 91f. (Seminário apresentado à Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal). Não publicado.



Ainda segundo Batista (2008), quando a pressão de vapor diminui com o decréscimo do diâmetro do capilar, a tensão superficial aumenta e consequentemente aumenta a tensão capilar. Numa rede de tubos capilares de diferentes diâmetros, ocorrem forças de tensão nos meniscos balanceados. Deste modo, os tubos estreitos tiram líquido dos tubos mais largos.

Stamm (1964) complementa que o movimento capilar é favorecido pelo aumento da temperatura, pela existência de bolhas de ar no interior das células e pelo aumento do diâmetro das pontuações, o que segundo Tomaselli (1981), torna-se o fluxo de fluido na madeira acima do ponto de saturação das fibras mais complexo. Hart (1965) ainda cita que a presença de bolhas de ar dentro das cavidades celulares, em função da pressão do ar mais pressão do vapor d'água produzidos pelo aquecimento, fazem com que a água movimente-se através das pontuações para as células adjacentes (Figura 2).

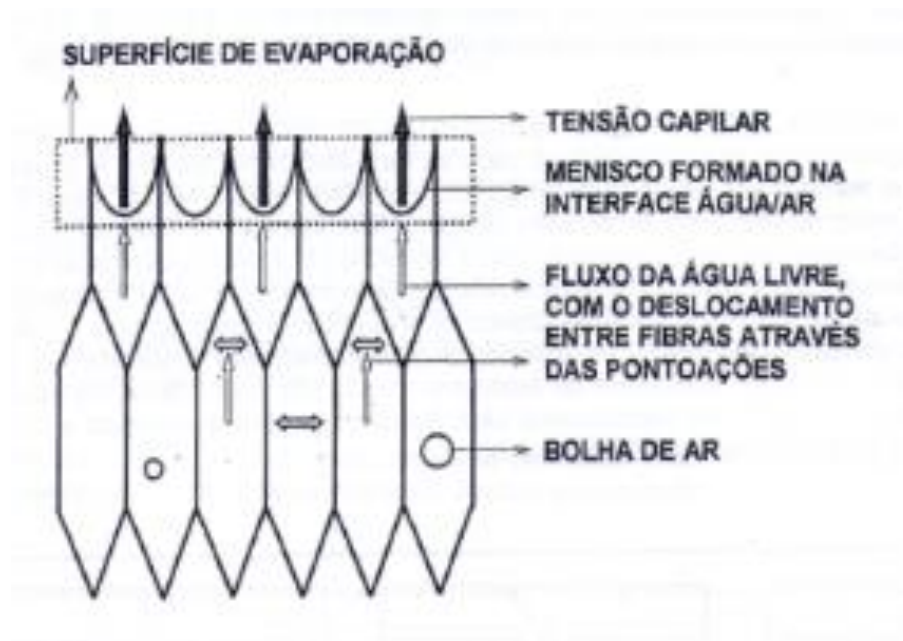


FIGURA 2 - Esquema demonstrativo do fluxo de água livre pelas pontuações, até atingir a superfície de evaporação

Fonte: Jankowsky (2009).

Siau (1984); Tomaselli (1981); Batista (2008) afirmaram que a existência de bolhas de ar no interior da madeira reduz o fluxo capilar de maneira bastante significativa. Podendo ser explicado segundo os autores por duas formas distintas.

A primeira seria que quando o raio capilar é menor que o diâmetro de uma bolha de ar, a tensão capilar no sistema celular promove a expansão desta bolha. As expansões das bolhas de ar promovem o alívio da tensão capilar, e consequentemente, a redução do fluxo de água capilar. A segunda forma de expressar este fenômeno é quando uma bolha de ar é forçada a passar na abertura de uma pontuação, a interface ar-água desta bolha em forma de uma esfera deve ser deformada de tal forma que o raio inicial do menisco ar-água se iguale ao raio da abertura da pontuação o que torna necessário uma considerável pressão, ocasionando redução do movimento de água livre.

### 3.7.2 Movimentos de fluido sob forças de difusão

O fluxo de fluidos na madeira abaixo do ponto de saturação das fibras, em que ocorre conjuntamente a movimentação da água higroscópica e do vapor d'água pelo fenômeno de difusão em um tipo de transporte conhecido como transporte em estado instável ou não constante (SIAU, 1984). Portanto, o fluxo de umidade e o gradiente são variáveis no tempo e no espaço o que torna-se um pouco mais complexo a determinação dos coeficientes de difusão, tempo de secagem e os teores de umidade (STAMM, 1964; SIAU, 1984; GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

Wassipaul (1977); Vital (1991) descrevem que difusão é o fluxo molecular de massa em um sistema físico químico sobre efeitos de um gradiente de concentração. Siau (1984); Mendes<sup>2</sup> (1999) relataram que, caso o fluxo e o gradiente de concentração de umidade ocorra em estado constante no espaço e no tempo, a quantidade de umidade removida da madeira pode ser determinada pela primeira lei de Fick (Equação 3), sendo uma expressão matemática análoga às leis de Darcy e Fourier. Nestas condições, o teor de umidade superficial da madeira reduz para valores inferiores a umidade de saturação do ar, ficando assim, estabelecido um gradiente de umidade que origina as forças que movem a água abaixo da umidade de saturação ao ar.

$$K_d = \frac{m * L}{t * A * \Delta U} \quad (3)$$

<sup>2</sup>MENDES, L. M. **Movimentação de água abaixo do ponto de saturação das fibras**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1999. 63f. (Trabalho apresentado ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal). Não publicado.

Em que:

$K_d$  = coeficiente de condutibilidade para difusão do vapor d'água pela madeira [ $\text{g.cm}^{-2}\text{seg}$ ];

$m$  = massa de vapor d'água transportada [g];

$L$  = comprimento da amostra na direção do fluxo [cm];

$A$  = área transversal da amostra perpendicular à direção do fluxo [ $\text{cm}^2$ ];

$\Delta U$  = diferença de umidade entre as superfícies paralelas separadas pela distância  $L$  [%].

EQUAÇÃO 3 - Primeira Lei de Fick

No entanto, ainda segundo Siau (1984) o fluxo para esta condição é diretamente proporcional ao gradiente de concentração de umidade e que o coeficiente de condutividade para a translocação da água de impregnação é igual a relação do fluxo pelo gradiente, concomitantemente, o coeficiente de difusão na madeira para um estado constante determinado pela Equação 4.

$$D_g = \frac{100 \cdot K_d}{\rho \cdot G} \quad (4)$$

Em que:

$D_g$  = coeficiente de difusão de vapor d'água na madeira [ $\text{cm}^2.\text{seg}$ ];

$K_d$  = coeficiente de condutibilidade para difusão do vapor d'água pela madeira [ $\text{g.cm}^{-2}\text{seg}$ ];

$\rho$  = massa específica do líquido [ $\text{g.cm}^{-3}$ ];

$G$  = massa específica da madeira [ $\text{g.cm}^{-3}$ ].

EQUAÇÃO 4 - Coeficiente de difusão de vapor d'água na madeira

Entretanto, as soluções correspondentes às equações da Lei de Fick, não correspondiam de forma satisfatória aos valores experimentais, podendo chegar até ao dobro para o sentido longitudinal e cerca de trinta vezes no sentido tangencial. Esta discrepância de valores segundo Tomaselli (1981); Mellado (1999); Mendes (1999) são em decorrência do fluxo de fluidos na madeira não se pronunciar de forma constante no espaço e nem no tempo. Tomaselli (1974) ainda complementa denominando o fenômeno de “difusão impedida”, sendo sua elucidação, pelo fato

das aberturas minúsculas das membranas das pontoações, cujo diâmetro é menor do que o "caminho livre médio" das moléculas de gás (vapor de água) para que ocorra o fluxo sem turbulência. Neste caso, as moléculas que entram na abertura da membrana da pontoação, com qualquer ângulo de inclinação, chocam-se com a parede lateral do capilar, sendo adsorvida temporariamente nessas paredes. Uma vez adsorvidas, estão sujeitas a mais colisões, tanto com a parede como com outras células. É evidente que a probabilidade das moléculas avançarem nestas condições é baixa, em comparação com a difusão através de capilares de diâmetros maiores que o "caminho livre médio", a exemplo das cavidades das fibras.

Consequentemente, a Lei de Fick é reformulada, sendo o fenômeno de difusão na madeira considerado com um fluxo em estado não constante, sendo o fluxo e o gradiente variáveis no tempo e no espaço. Nesta situação, qualquer variação de umidade da madeira ocorre modificações internas estruturais num intervalo de espaço e tempo, sendo conhecida como a Segunda Lei de Fick, sendo expressa pela Equação 5.

$$\frac{dU}{dt} = Dg * \frac{d^2 * U}{dx^2} \quad (5)$$

Em que:

$dU/dt$  = derivada da umidade removida [U] em função do tempo [t];

$Dg$  = coeficiente de difusão [ $cm^2.seg$ ];

$\frac{d^2U}{dx^2}$  = segunda derivada da umidade em função do espaço [x].

EQUAÇÃO 5 - Segunda Lei de Fick

Em função da interação existente entre o fluxo de fluido da difusão (parede celular) com o movimento de água capilar (lumens celulares), os coeficientes de difusão podem ser mensurados experimentalmente por três métodos (SIAU, 1974; MENDES, 1999).

- I. Determinação dos gradientes de umidade formados na madeira sob condições controladas;
- II. Determinação do fluxo de fluido pela madeira sob um estado constante e;

- III. Determinação da taxa de secagem da madeira sob condições controladas em um estado não constante.

Ainda segundo Mendes (1999), a determinação da taxa de secagem sob condições controladas em um estado não constante, é o método que se obtém os melhores resultados, obtendo correlações entre as determinações experimentais e os cálculos teóricos de forma satisfatória.

### **3.7.3 Cinética da secagem**

O processo de remoção de umidade da madeira ocorre em função do gradiente de umidade desenvolvido na madeira (SIMPSON, 1991; MELLADO, 2007), sendo considerada em duas fases, movimento de água do interior para a superfície e a remoção da umidade da superfície para o meio secante. Simpson (1991); Klitzke (2007) ainda complementam que a secagem de madeiras é um processo térmico, em que ocorre simultaneamente, transferência de calor e massa.

Na secagem desenvolvida em câmaras convencionais de secagem, vários pesquisadores dentre eles, Simpson (1991); Jankowsky (1995); Klitzke (2007); Mellado (2007), distinguem-se três etapas em função da variação da taxa de secagem e que determinam a curva característica de secagem do material, as quais são a fase linear, parabólica e exponencial.

Na fase inicial da secagem, tida como primeira fase da secagem, a taxa de evaporação da umidade ocorre de forma linear (KLITZKE, 2007) e ainda segundo Mellado (2007) é proporcional à diferença de temperatura do ar secante com a temperatura da superfície da madeira. Siau; Avramidis (1996); Mellado (2007) complementam que no primeiro estágio, quando a superfície da madeira está bem acima do ponto de saturação das fibras, ocorrendo fluxo capilar, o que corresponde ao período de secagem constante, no qual, a taxa de perda de umidade é constante e a temperatura da superfície saturada mantém-se semelhante à temperatura do bulbo úmido da estufa.

Em função da temperatura superficial da madeira ser correspondente à temperatura do bulbo úmido, a transferência de calor por convecção é em sua totalidade utilizada para a evaporação da umidade superficial da madeira, juntamente com a corrente de ar utilizada, concomitantemente, ocasiona a redução

da temperatura da madeira (SANTINI, 2000; MELLADO, 2007) esta remoção de umidade não acarreta em variações dimensionais da madeira.

Esta fase da secagem é finalizada quando o filme de umidade contido na superfície da madeira, não se mantém, sendo que as primeiras camadas superficiais atingiram o ponto de saturação das fibras, alterando-se assim, o mecanismo do fluxo de fluido, o qual, dar-se o início da segunda fase da secagem.

A segunda fase da secagem, em que ocorre simultaneamente a remoção de fluidos por forças capilares, sendo esta, bastante reduzida e a remoção de fluidos por forças de difusão. Nesta etapa a transferência de calor por convecção começa a não ser significativa, sendo a transferência de calor por condução ocorrer de forma proeminente (KLITZKE, 2007).

Pelo fato do fluxo de fluidos ocorrer pelo fenômeno de difusão, a taxa de secagem é influenciada pelas condições termodinâmicas do fluxo de ar e pelas características intrínsecas da própria madeira, sendo que a taxa de secagem ocorre de forma decrescente, como uma função parabólica (MELLADO, 2007; KLITZKE, 2007).

A terceira fase da secagem, decorre com a taxa de secagem ainda de forma decrescente, sendo iniciada, quando a remoção de umidade da madeira processa-se apenas por forças de difusão. A transferência de calor ocorre quase que sua totalidade por condução e a velocidade de secagem é regulada pelas características intrínsecas da madeira (MELLADO, 2007; KLITZKE, 2007).

### 3.8 TAXA DE SECAGEM

A taxa de secagem ou velocidade de secagem refere-se à quantidade de umidade evaporada, em certo intervalo de tempo em relação à área de evaporação da peça de madeira. Com as informações fornecidas pode-se estimar o tempo de secagem de uma determinada espécie da condição de madeira verde, até um teor de umidade considerado a uma dada temperatura e umidade de equilíbrio (KLITZKE; BATISTA, 2010).

De acordo com Hildebrand (1970); Herzberg et al., (1985); Klitzke (2007); Klitzke; Batista (2010), a taxa de secagem, depende dos fatores inerentes à madeira

(espécie, características anatômicas, permeabilidade, massa específica, teor de umidade), assim como, dos fatores inerentes ao processo (temperatura, umidade relativa, velocidade de circulação do ar, largura da pilha de madeira, espessura dos separadores). Santini; Haselein (2002) complementa que o gradiente de umidade formado ao longo do processo de secagem também influencia na velocidade de secagem da madeira. Portanto a taxa de secagem é uma variável a qual fornece informações relevantes do comportamento da madeira ao longo da secagem.

Santini; Haselein (2002) avaliando alguns estudos com madeiras de coníferas, encontrou reduções do tempo de secagem com utilização de temperaturas mais altas, assim como, pelo aumento da velocidade de circulação do ar. O que de acordo com os autores, o aumento linear da taxa de secagem em razão da elevação da temperatura entre 60 e 180 °C, foi observado em estudos anteriores conduzidos em estufa de laboratório (SANTINI, 1980). O emprego de altas temperaturas e altas velocidades de ar, nas estufas de secagem, resulta em aumento da taxa de transferência de calor para a madeira e, conseqüentemente, em maiores taxas de secagem. Milota; Tschernitz (1990) complementam que no início da secagem, quando a madeira possui alto teor de umidade, a transferência de calor é o mecanismo controlador e a taxa de secagem estimada é uma função da velocidade do ar e da depressão do bulbo úmido. Quando a madeira está mais seca, a taxa de secagem estimada é uma função da temperatura do bulbo seco e do teor de umidade.

Santini (1980) afirmou que a taxa de secagem no intervalo de umidade verde até 10%, apresenta influência de forma linear com a temperatura, assim como, estudos realizados por Tomaselli (1981). Santini (2000) utilizando a temperatura da madeira como controle do processo de secagem, observou um aumento do tempo de secagem da madeira de *Pinus elliotti* em até 24% quando realizou alterações da temperatura de secagem de 90 para 70 °C. Resultados nesta mesma tendência foram encontrados por Klitzke (2002).

A velocidade de circulação do ar exerce influência de forma significativa na taxa de secagem durante o período de taxa constante, quando a madeira possui altos teores de umidade (TOMASELLI, 1977; SALAMON; MCLNTYRE, 1969; WENGERT; DENIG, 1995; KLITZKE, 2002). Em razão disso, a ocorrência de altas taxas de secagem é comum no início do processo (KLITZKE, 2002) porém, a partir

do momento em que a água superficial é evaporada da madeira, a taxa torna-se decrescente.

Hart et al. (1986) avaliando o comportamento da madeira de *Southern pine* sob diferentes velocidades de circulação do ar, constatou reduções de forma gradativas no tempo de secagem a partir de manipulações na velocidade de circulação do ar. Não obstante, Simpson (1997) estudando madeiras de *Eastern White pine* com 25 mm de espessura, também constatou que a velocidade de circulação do ar exerce influência na taxa de secagem da madeira.

A temperatura e a velocidade de circulação do ar são variáveis que devem ser balanceadas de forma a proporcionar o melhor equilíbrio no processo de secagem da madeira, visando sempre a redução dos custos operacionais do processo, minimização dos defeitos decorrentes da remoção de umidade da madeira, sempre priorização a remoção da umidade seja ela nas fases linear, parabólica e exponencial.

Em qualquer estudo relacionado a secagem de madeira, é notório a descrição da taxa de secagem, os quais podemos citar o estudo de Santos et al. (2003) em que obtiveram taxa de secagem para a remoção da água capilar de 1,44 e 0,31 g.h<sup>-1</sup> para a remoção da água higroscópica, para madeira de *Eucalyptus grandis* tendo a madeira 51% de umidade inicial. Brandão (1989) obteve taxas de secagem respectivas desde a condição verde até 5% e verde até 30% de umidade de 2,50 e 10,94 g.h<sup>-1</sup>, para madeira de *Eucalyptus saligna* com umidade inicial de 91,8%.

Outra forma de expressar a taxa de secagem é a razão da porcentagem de umidade removida por hora, em que Susin (2012) encontrou valores de 0,0632; 0,1258 e 0,1138 (%U.h<sup>-1</sup>) respectivamente para madeiras de *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus saligna*. Batista (2009) realizando secagem conjunta de nove clones de *Eucalyptus* encontrou valores de taxa de secagem expressa nesta mesma unidade de 0,12; 0,14 e 0,16 (%U.h<sup>-1</sup>), respectivamente para seus três tratamentos avaliados.

A determinação da taxa de secagem realizada com amostras de menores dimensões é expressa pela razão da umidade removida dada em uma unidade mássica pela área da amostra em função do tempo. Ciniglio (1998) em estudos semelhantes obteve valores de taxa de secagem de 0,0173; 0,0350 e 0,0079 g.(cm<sup>2</sup>.h)<sup>-1</sup> para as condições de verde a 5%, verde a 30% e 30% a 5% de umidade, para a madeira de *Eucalyptus grandis* com umidade inicial média de 80,9%. Barbosa



et al. (2005) estudaram 10 clones de *Eucalyptus* e obtiveram taxas de secagem médias de 0,0187; 0,0337 e 0,0082 g·(cm<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup> respectivamente para as condições de verde a 5%, verde a 30% e 30% a 5% de umidade, a um teor de umidade inicial médio de 102,4%.

Susin (2012) estudando madeiras do gênero *Eucalyptus* valores de taxa de secagem de 0,0149; 0,0375 e 0,0067 g·(cm<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup> para as condições de verde a 5%, verde a 30% e 30% a 5% de umidade, para a madeira de *Eucalyptus robusta* com umidade inicial média de 79,36%. Para madeira de *E. saligna* os valores de taxa de secagem encontrados pelo autor foram de 0,0148; 0,0310 e 0,0064 g·(cm<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup> para as condições de verde a 5%, verde a 30% e 30% a 5% de umidade, com umidade inicial média de 64,70%.

Jankowsky (2009) desenvolvendo uma metodologia simplificada para elaboração de programas de secagem, encontrou valores de taxa de secagem para a madeira de jatobá de 0,0159; 0,0395 e 0,0114 g·(cm<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup> para as condições de verde a 5%, verde a 30% e 30% a 5% de umidade, respectivamente. Para madeira de pau marfim os valores de taxa de secagem encontrados pelo autor foram de 0,0217; 0,0500 e 0,0117 g·(cm<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup> para as condições de verde a 5%, verde a 30% e 30% a 5% de umidade, respectivamente.

### 3.9 DEFEITOS DE SECAGEM

O efeito da remoção de umidade da madeira é acompanhado de desenvolvimento de tensões resultantes do gradiente de umidade entre regiões contíguas da madeira e da anisotropia de contração, sendo a ocorrência deste fenômeno sob quaisquer condições de secagem (SANTINI, 1992; SUSIN, 2012).

Brandão (1989) define defeitos de secagem como alterações que ocorre na estrutura da madeira que dificulte seu reprocessamento, em uma fase posterior. Para Santini (1992) a agregação de valor à madeira, com o processo de secagem, é necessário adotar procedimentos adequados, que visem a minimização da ocorrência de defeitos durante esta etapa.

Ponce; Watai (1985) destacam que a seleção e disposição correta dos separadores na pilha de madeira a ser seca, contribui para a redução dos

empenamentos, Marques (2008) ainda complementa que o conhecimento das características da madeira é fundamental para o controle da secagem.

Os principais defeitos gerados durante o processo de secagem são os empenos, as rachaduras, o colapso e o endurecimento superficial (Figura 3).



FIGURA 3 - Principais defeitos ocasionados pela secagem da madeira  
Fonte: Susin (2012), modificado.

### 3.9.1 Rachaduras

Os defeitos de rachaduras na madeira, ocasionada pela remoção de umidade da madeira, segundo Oliveira (1981); Galvão; Jankowsky (1985), são consequências da diferença de retração nas direções radial e tangencial da madeira e pelo gradiente de umidade formado entre regiões contíguas de uma peça, durante o processo de secagem. Estas diferenças levam ao aparecimento de tensões que, tornando-se superiores à resistência dos tecidos lenhosos, provocam a ruptura da madeira.

Brandão (1989) relatou que nas fases iniciais de secagem as rachaduras podem ocorrer no topo da madeira e nas superfícies, podendo posteriormente, surgir as rachaduras internas, que só são identificadas com o seccionamento transversal

da madeira. O surgimento das rachaduras é em função da formação de tensões de tração superior à resistência perpendicular as fibras da madeira.

Vários autores estudaram a ocorrência deste tipo de defeitos durante a secagem de madeiras (RASMUSSEN, 1961; TERAZAWA, 1965; GALVÃO; JANKOWSKY, 1985; BRANDÃO, 1989; SIMPSON, 1991) em que relataram que as rachaduras superficiais são falhas que usualmente ocorrem nas células de raio, em toda sua extensão, podendo também ocorrer nos canais resiníferos, normalmente com ocorrência nos estágios iniciais da secagem e em madeiras orientadas tangencialmente. Já as rachaduras de topo, em que, se manifestam nos extremos da madeira, em razão do gradiente de umidade que se forma ao longo da madeira, desenvolvem tensões de secagem nos topos. Já as rachaduras internas ou em favos de mel, em alguns casos resultam em rachaduras superficiais (PONCE; WATAI, 1985), sendo que aparecem principalmente, em madeiras de densidade elevada, baixa permeabilidade, peças mais espessas e que foram secas com temperaturas altas. Oliveira (1981); Galvão; Jankowsky (1985); Klitzke (2007) relataram que as rachaduras internas também podem estar associadas com o colapso e o endurecimento superficial. Uma vez desenvolvidas, as rachaduras internas não poderão ser eliminadas e, na grande maioria dos casos, a madeira não poderá ser utilizada.

### **3.9.2 Empenamentos**

Klitzke (2007) define empenamento como uma deformação que experimenta uma peça de madeira pela curvatura de seus eixos longitudinal, transversal ou ambos, podendo ser do tipo encanoamento, arqueamento, encurvamento, encurvamento complexo e torcimento. Simpson (1991) relatou que todos os tipos de empenamentos são oriundos da diferença de contrações da madeira (radial, tangencial e longitudinal), além das características intrínsecas à própria espécie com o desenvolvimento de tensões de crescimento, presença de irregularidades da grã, presença de lenho juvenil e árvores que desenvolveram lenho de reação, assim como, do modelo de desdobro da tora.

Madeiras que apresentam o defeito de encanoamento, as margens das tábuas permanecem aproximadamente paralelas e ela adquire um aspecto “encanoado” ou de “canaleta” (BATISTA, 2009). Galvão; Jankowsky (1985);

Simpson (1991) enfatizaram que em consequência da diferença de contração entre as direções radial e tangencial é a principal causa deste tipo de defeito. Tábuas orientadas radialmente não apresentam este tipo de defeito. O encanoamento começa a se desenvolver no início e agrava-se progressivamente com a continuação da secagem e pode causar excessivas perdas de madeira no beneficiamento. A pressão exercida pelos rolos das plainas frequentemente causa rachaduras em tábuas encanoadas (SIMPSON, 1991). Empilhamento realizado de forma adequado e a utilização de restrição nas pilhas são ajudam a minimizar o defeito de encanoamento (SIMPSON, 1991; MELO, 1999; BATISTA, 2009).

Já o arqueamento ocorre em função da diferença na contração longitudinal entre laterais, da mesma peça de madeira (SUSIN, 2012), oriundos da diferença do tipo de lenho (juvenil e adulto) nas extremidades da peça, assim como, pela presença de madeira de reação. Madeira orientadas radialmente, são mais propensas a este tipo de empeno. Sua forma de controle torna-se difícil pela inexistência de restrições laterais das pilhas.

O encurvamento também ocorre em função da diferença de retração nas faces da peça quando uma delas sofre secagem mais acelerada que a outra, a irregularidades de grã e a tensões desenvolvidas durante o crescimento da árvore. A utilização de barras de contenções nas pilhas e a correta disposição dos separados ajudam a minimizar o índice deste tipo de empenamento.

O encurvamento complexo e torcimento são tipos de empenamentos em que a madeira apresenta mais de uma curvatura ao longo do comprimento da peça, sendo suas causas e formas de controle semelhantes ao encurvamento simples.

### **3.9.3 Colapso**

Kollmann; Côté Junior (1968); Brandão (1989) definem colapso como um achatamento ou deformação celular da madeira durante a secagem, ocasionando contrações irregulares na madeira.

O colapso ocorre quando os esforços da tensão capilar excedem a resistência à compressão perpendicular à grã da parede celular a qual ocorre normalmente quando os meniscos se movem através das pontoações da parede celular (KLITZKE, 2007), tendo portanto, seu início a um teor de umidade acima de 100% e

se completa quando a madeira atinge o máximo de 50 a 70% de umidade (SANTINI; TOMASELLI, 1980; BRANDÃO, 1989).

Ainda de acordo com Santini; Tomaselli (1980) as paredes celulares menos espessas do lenho inicial, apresenta resistência mecânica a compressão menor, sendo que, a ocorrência deste defeito se pronuncia mais fácil nesse tipo de lenho do que no lenho tardio. No entanto, Brandão (1989), relatou que há casos isolados que o lenho tardio pode sofrer maiores intensidades de colapso que o lenho inicial, em função da diferença do tamanho dos poros. A presença de extrativos na parede celular da madeira também influencia no surgimento do colapso, segundo Bramhall; Wellwood (1976), em vista que estas substâncias químicas obstruem o fluxo de fluido nas paredes celulares.

Além das características intrínsecas à madeira, fatores relacionados ao ambiente de secagem influenciam o surgimento deste defeito, conforme relatado por Galvão; Jankowsky, (1985); Brandão (1989); Klitzke (2007), sendo a temperatura, umidade relativa e o tempo de secagem fatores que contribuem para o surgimento do colapso na madeira.

Brandão (1989) relata que a temperatura interna da madeira é a variável mais importante para a ocorrência do colapso, ficando em segundo plano a temperatura do ar secante. Com relação à umidade relativa, Santini; Tomaselli (1980) descrevem esta, como uma variável ambiental que propicia a ocorrência deste defeito sendo de forma indireta, pelo fato, da baixa umidade relativa proporcionar tensões residuais na madeira e que o colapso aumenta com a duração da secagem, para qualquer temperatura utilizada.

### 3.10 PROGRAMAS DE SECAGEM

Programa de secagem de acordo com Oliveira (1981); Brandão (1989); Ciniglio (1998); Andrade (2001); Susin (2012) é uma sequência de interferências ou ações que são realizadas durante a secagem por meio do controle da temperatura e da umidade relativa, o qual tem por objetivo a remoção de umidade da madeira ao longo de toda sua etapa com o compromisso da qualidade que o produto a ser manufaturado necessita.

O desenvolvimento ou a escolha de um programa de secagem deve-se levar em consideração a espécie (massa específica, permeabilidade, contração), a umidade inicial e final, espessura do material, utilização final do produto e o equipamento utilizado para a secagem (MARTINS, 1988). No entanto, Jankowsky et al. (2003) enfatizaram que a velocidade de secagem depende mais das características intrínsecas à espécie do que da temperatura ou umidade relativa do ar secante.

Galvão; Jankowsky (1985); Klitzke (2007) relataram uma heterogeneidade de tipos de programas de secagem, os quais devem ser adotados em função das características da espécie, qualidade desejada, equipamento empregado e forma de operação do programa. Estes mesmo autores citaram programas baseados em umidade-temperatura, programas baseados no potencial de secagem e programas com base no tempo-temperatura.

Os programas do tipo umidade-temperatura são os mais comuns na secagem convencional. Neste tipo de programa, a temperatura do ar no interior do secador (e consequentemente a umidade relativa também) é ajustada em função do teor de umidade da madeira (HILDEBRAND, 1970; PRATT, 1974; GALVÃO; JANKOWSKY, 1985; KLITZKE, 2007).

Os programas de secagem são realizados com base em etapas distintas, as quais, tem suas características e peculiaridades próprias de suma importância para o processo de secagem. Dentre elas, podemos citar a etapa inicial em que consiste do aquecimento da madeira, posteriormente, a secagem propriamente dita, sendo esta subdividida em fases que mais se adéqua, à umidade da madeira, temperatura, umidade relativa e ao potencial de secagem, frisando a qualidade desejada e por fim, a fase de controle da qualidade seguida pelo resfriamento da madeira GALVÃO; JANKOWSKY, 1985; KLITZKE, 2007).

Um programa de secagem pode ser empregado com base nos descritos na literatura, assim como, desenvolvidos de forma específica para cada espécie, baseando-se em recomendações e diretrizes existentes na própria literatura, sendo os mais comuns as descrições de Terazawa (1965); Brandao (1989); Simpson (1996); Ciniglio (1998); Jankowsky (2009).

Em função da dificuldade de elaboração de programas de secagem alguns pesquisadores têm estudado a viabilidade de desenvolver metodologias

simplificadas para atender as necessidades das indústrias madeireiras (BRANDÃO, 1989).

Em meados da década de 60, Terezawa (1965) desenvolveu uma metodologia específica para elaboração de programas de secagem para madeiras com base na incidência de alguns defeitos proporcionados pelo processo, sendo eles, rachaduras e o colapso em diferentes intensidades. Para tanto, este pesquisador submeteu amostras de madeiras em um ambiente a 100°C, em que definiu a temperatura inicial e final, assim como, a diferença entre o bulbo seco e úmido para diferentes espécies.

Brasil (1981) estudando espécies da região amazônica, quanto ao seu comportamento na secagem, empregou duas metodologias distintas para elaboração de programas, determinando uma classificação de secagem com base em níveis que vai de muito rápido até patamares de muito lento.

Brandão (1989) foi o precursor no desenvolvimento de uma metodologia para a indicação de programas de secagem no Brasil, sendo inspirado nos estudos de Terezawa (1965), o qual realizou modificações no processo, tornando-se a metodologia mais simplificada. Os parâmetros determinados pelo autor para a elaboração do programa é a determinação da temperatura inicial e final do programa e o potencial de secagem.

Simpson (1996) desenvolveu uma metodologia para a elaboração de programas de secagem com base na massa específica da amostra utilizada para a secagem acelerada. Os parâmetros empregados pelo autor, são a temperatura inicial de secagem e a depressão psicrométrica inicial, sendo que, a partir destes parâmetros há a determinação do potencial de secagem para a espécie utilizada.

Ciniglio (1998) elaborando programas de secagem para madeiras do gênero *Eucalyptus*, com base na metodologia desenvolvida por Brandão (1989), encontrou alguns pontos da metodologia sugerida que poderiam ser adaptados para melhor execução laboratorial, dentre elas, modificações das dimensões das amostras. Estas modificações dimensionais das amostras tornaram-se a fase laboratorial mais rápida sendo amplamente utilizada pela comunidade científica (Barbosa et al., 2005; Eleotério; Silva, 2012; Susin, 2012; Arruda, 2014; Eleotério; Silva, 2014)

Jankowsky (2009) afim de avaliar a influência das dimensões das amostras para a elaboração do programa de secagem baseado na metodologia de secagem drástica a 100 °C, em que a determinação dos parâmetros de temperatura inicial e

final, assim como, o potencial de secagem, são as variáveis de respostas. Tal autor concluiu que para esta metodologia as dimensões das amostras proposta por Ciniglio (1998) são as mais adequadas para a determinação dos parâmetros.



#### 4. REFERÊNCIAS

AGOSTINI, B. M. **Determinação das propriedades mecânicas da madeira.** Laboratório de Resistência dos Materiais. 2005. 20 p.

ALMEIDA, B. C. **Contribuição para melhoria do processo de secagem convencional de madeiras serradas na região norte do Estado do Mato Grosso.** 2011. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

AMODEI, J. B.; OLIVEIRA, B. R. U.; GURGEL, M. M.; CARVALHO, A. M.; MEDEIROS, R. A; LATORRACA, J. V. F. Avaliação preliminar da qualidade da madeira de *Tectona grandis* L. f. através da tomografia de impulso. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 17, p. 124-128, 2010.

ANDRADE, A. **Indicação de programas de secagem convencional de madeiras.** 2000. 72f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

ANDRADE, A. S. **Utilização de micropartículas de lignina Kraft combinadas com amido anfótero visando o aumento das propriedades do papel embalagem.** 2010. 211f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

ÂNGELO, H.; SILVA, V. S. M.; SOUZA, A. N.; GATTO, A. C. Aspectos financeiros da produção de teca no Estado do Mato Grosso. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 1, p. 23-32. 2009.

ARRUDA, P. M. **Secagem da madeira juvenil de *Tectona grandis* L. F.** 2013. 98f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira), Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2014.

AVELINO, E. F. **Avaliação da madeira de teca jovem (*Tectona grandis* L.f.) visando uso em movelaria.** 2012. 88f. Dissertação (Mestre em Ciências), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2012.

BARBOSA, C. G.; LIMA, J. T.; ROSADO, S. C. S.; TRUGILHO, P. F. Elaboração de programa de secagem para madeiras de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 40-48, 2005.

BATISTA, D. C. **Qualidade da secagem convencional conjunta da madeira de nove clones do gênero *Eucalyptus*.** 2009. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

BATISTA, W. R. **Emprego da reflectometria por domínio do tempo na determinação da umidade de madeiras comerciais.** 2008. 134f. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2008.

BELTRAME, R.; GATTO, D. A.; MODES, K.; STANGERLIN, D. M.; TREVISAN, R.; HASELEIN, C. Resistência ao impacto da madeira de açoita-cavalo em diferentes condições de umidade. **Cerne**, Lavras, v. 16, p. 499-504, 2010.

BHAT, K. M.; MA, H. O. **Teak Growers unite.** ITTO Tropical Forest Update, 2004. 5p.

BRAMHALL, G.; WELLWOOD, R. W. **Kiln drying of western Canadian lumber.** Vancouver: Western Forest Products Laboratory, 1976, 112p.

BRANDÃO, A. T. O. **Determinação de metodologia para a indicação de programas de secagem de madeiras.** 1989. 100f. Dissertação (Mestrado em

Ciências Florestais), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

BRASIL. SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA AMAZÔNIA. **Estudos sobre métodos de secagem de madeiras da Amazonia**. Belém, SUDAM, 1981. 18p.

BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. London, Interscience Publishers, 1963, 689 p.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos**. 2. ed. Revisada. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 219p.

CALEGARI, L.: STANGERLIN, D. M.: SANTINI, E. J.: HASELEIN, C. R.: LONGHI, S. J.: CARMO, P. I. O.: SILVA FILHO, L. C. P.: GATTO, D. A. Monitoramento do teor de umidade de madeiras de *Pinus elliottii*Engelm. e *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, sob diferentes temperaturas de secagem, através do ultra-som. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 4, p. 399-408, 2007.

CALIL JÚNIOR, C.; BARALDI, L.T.; STAMATO, G. C.; FERREIRA, N. S. S. **Estruturas de madeira**. São Carlos: USP – Departamento de Engenharia de Estruturas, 2000. 101 p.

CALIL, C. J.; ROCCO, F. A.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. São Carlos: Editora Manole, 2003, 152 p.

CARTER, I, SPRAGUE, M. **Improve lumber quality by analysing kiln environment**. Forestry Industries. 1989.

CINIGLIO, G. **Avaliação da secagem de madeira serrada de *E. grandis* e *E. urophylla***. 1998. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola

Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

CREMASCO, M. A. **Fundamentos de transferência de massa**. 2. ed. São Paulo: Unicamp, 2009. 736p.

CRESPO, R. G. ROMERO, E. J. CUNUHAY, P. S. BLANCO, G. L. FONSECA, C. S. Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de la madera de teca (*Tectona grandis* L.F.) de Quevedo y Balzar. **Maderas.Ciencia y tecnología**, Concepción, v. 1, n. 2 p.55-63, 2008.

DELGADO, L. G. M.; GOMES, J. E.; ARAUJO, H. B. Análise do sistema de produção de teca (*Tectona grandis* L.f.) no Brasil. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, Garça, v.1 n.11, p. 1-6, 2008.

DRESCHER, R. **Crescimento e produção de *Tectona grandis* Linn F., em povoamentos jovens de duas regiões do Estado de Mato Grosso – Brasil**. 2004. 133f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria 2004.

DURLO, M. A. Influência da temperatura de secagem no comportamento higroscópico da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. **Ciências Florestais**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 07 21, 1991.

ELEOTÉRIO, R. J. **Modelagem e simulação do processo de secagem de madeiras serradas de espécies tropicais brasileiras**. 2009. 249f. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

ELEOTERIO, J. R.; SILVA, C. M. K. Comparação de programas de secagem para Cumaru (*Dipteryxodorata*), Jatobá (*Hymenaea* spp) e Muiracatiara

(*Astroniumlecontei*) obtidos por diferentes métodos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, p. 537-545, 2012.

ELEOTERIO, J. R.; SILVA, C. M. K. Programas de secagem para marupá (*Simaroubaamara*), pará-pará (*Jacarandacopaia*) e virola (*Virolasurinamensis*). **Floresta**, Curitiba, v. 44, p. 313-322, 2014.

FARMER, R. H. **Chemistry in the utilization of wood**. Oxford, Pergamon Press, v. 9, 1967, 193 p.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood chemistry, ultrastructure, reactions**. Berlin, Walter de Gruyter, 1984, 613 p.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. de. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 157-174. 2009.

FINDLAY, W. P. K. The nature and durability of wood. In: FINDLAY, W.P.K. (Ed). **Preservation of timber in the tropics**. Dordrecht: Martinus Nijhoff/ Dr. W. Junk Publishers, 1985, 273p.

FOREST PRODUCTS LABORATORY – LPF. **Wood handbook – Wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, Wisconsin: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. ed. 100, 508 p. 2010.

FREUDEMBERG, K. **Constitution and biosynthesis of lignin**. New York, Springer-Verlag, Berlin, p. 74 – 122, 1968.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 111p.

GOMES, D. F. F.; SILVA, J. R. M.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F. Avaliação da estabilidade dimensional da madeira acetilada de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 70, p.125 - 130, 2006.

GONÇALVES, F. G.; OLIVEIRA, J. T. S.; DELLA LUCIA, R. M.; NAPPO, M. E.; SARTÓRIO, R. C. Densidade e variação dimensional de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Árvore**, Viçosa, v.33, n.2, p.277-288, 2009.

GURMARTINE, T; GOUDZWAARD, L. **Tree factsheet *Tectona grandis* L.**. Forest Ecology and Forest Management Group: Wageningen University. 2010. Disponível em: <<http://webdocs.dow.wur.nl/internet/fem/uk/trees/tecgraf.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2014.

HART, C. A. **The drying of wood**. Raleigh: North Caroline Agricultural Extension Service, 1965. 24 p. (Extension circular, 471).

HART, C. A.; DENIG, J.; HANOVER, S. **Variables affecting drying rate and quality**. In: Proceedings, Drying softwood and hardwood lumber for quality and profit conference. Charlotte, N. C. Madison, WI: Forest Products Research Society, 1986.

HELLMEISTER, J. C. **Sobre a determinação das características físicas da madeira**. 1973. 161f. Tese (Doutorado em Engenharia dos Materiais) Universidade de São Paulo, São Carlos, 1973.

HERZBERG, B. L.; TAYLOR, F. W.; ROSEN, H. N. Factors that affect the time required to high-temperature dry pine dimension lumber. **Forest Products Journal**, v. 35, n. 7/8, p. 34-36, 1985.

HILDEBRAND, R. **Kiln drying of sawn timber**. Germany: Maschinenbau GmbH, 1970. 199p.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ (2014). **Anuário estatístico da IBÁ 2014**: ano base 2013. Brasília: IBÁ, 2014. 100 p.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e da massa**. Tradução e revisão técnica: Eduardo Mach Queiroz, Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 643p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Informações sobre madeiras (Teca)**. Consultas online. São Paulo, SP. 2010. Disponível em: <[http://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras/78.htm](http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/78.htm)>. Acesso em: 14 nov. 2014.

INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION. **Annual review and assessment of the world timber situation 2008**. Yokohama, 2009. 216p. (ITTO. Document GI-7/08).

JANKOWSKY, I. P. Equipamentos e processos para secagem de madeiras. In: Seminário internacional de utilização da madeira de eucalipto para serraria, 1995, São Paulo. **Anais...** Piracicaba: IPEF/IPT, 1995. 109-118p.

JANKOWSKY, I. P. **Metodologia simplificada para a indicação de programas de secagem**. 2009. 112f. Tese (Livre docência em Ciência e Tecnologia da Madeira), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009.

JANKOWSKY, I. P.; SANTOS, G. R. V.; ANDRADE, A. Secagem da madeira serrada de eucalipto. **Circular Técnica do IPEF**, Piracicaba, n.199, p.1-14, 2003.

KEEY, R. B; LANGRISH, T. A. G.; WALKER, J. C. F. **Kiln-drying of lumber**. Berlin: Springer Verlag, 2000. 326p.

KLITZKE, R. J. Secagem da madeira. In: José Tarcísio da Silva Oliveira, Nilton César Fiedler, Marcelo Nogueira. (Org.). **Tecnologias aplicadas ao setor**

**madeireiro**. Visconde do Rio Branco: Suprema Gráfica e Editora Ltda, 2007, v. 1, p. 271-366.

KLITZKE, R. J. **Uso do inversor de frequência na secagem de madeiras**. 2002. 239f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

KLITZKE, R. J.; BATISTA, D. C. Ensaio de taxa de secagem e escore de defeitos para a predição da qualidade de secagem convencional da madeira de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, v. 38, n. 85, p. 97-105, 2010.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da Madeira**. 3ª Ed. revisada. Curitiba. 2005.

KOLLMANN, F. E. P. **Tecnologia de la madeira e sus aplicaciones** , v. 2, Madrid, 1959, 675 p.

KOLLMANN, F. E. P.; CÔTE JUNIOR, W. A. **Principles of wood science and technology**. New York: Springer-Verlag, 1968. 592p.

KOLLMANN, F. F. P.; SHENEIDER, A. Der eiflub der stromungsgessshwin-digkeit aufdie heibdampftrockung von shnittholz. **Holz als Rohn-un Werkstoff**, v. 19, p. 461-478, 1961.

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos**: ecossistemas florestais e respectivas espécies arbóreas: possibilidades e métodos de aproveitamento sustentado. Eschborn: Instituto de Silvicultura da Universidade de Göttingen, GTZ, 1990. 343 p.

LIMA, I. L.; FLORSHEIM, S. M. B.; LONGUI, E. L. Influência do espaçamento em algumas propriedades físicas da madeira de *Tectona grandis* Linn . **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 2, p. 244-250, 2009.



LOGSDON, N. B.; CALIL JUNIOR, C. Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 18, p. 77-108, 2002.

LOPES, C. S. D.; NOLASCO, A. M.; TOMAZELLO FILHO, M.; DIAS, C. T. S.; PANSINI, A. Estudo da massa específica básica e da variação dimensional da madeira de três espécies de eucalipto para a indústria moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 315 - 322, 2011.

LOPES, J. O.; GARCIA, R. A.; NASCIMENTO, A. M.; LATORRACA, J. V. F. Uniformização da cor da madeira jovem de teca pela termorreificação. **Árvore**, v.38, n.3, p. 561-568, 2014.

MACEDO, R. L. G.; GOMES, J. E.; VENTURINI, N.; SALGADO, B.G. Desenvolvimento inicial de *Tectona grandis* L. f. (Teca) em diferentes espaçamentos no município de Paracatu, MG. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 61-69, 2005.

MACKAY, J. F. G.; OLIVEIRA, L. C. **Kiln operator's handbook for Western Canada**. Vancouver: Forintek Canada Corp., 1989. 61p.

MADSEN, B. **Structural Behaviour of Timber**. North Vancouver, British Columbia. Canada. Timber Engineering Ltda. 1992, 437p.

MARQUES, M. H. B. **Agrupamento de 41 espécies de madeiras da Amazônia para secagem baseado em características anatômicas e físicas**. 2008. 125f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

MARQUES, S. S.; OLIVEIRA, J. T. S.; PAES, J. B.; ALVES, EDENISE, S.; SILVA, A. G.; FIEDLER, N. C. Estudo comparativo da massa específica aparente e retratibilidade da madeira de pau-brasil (*Caesalpinia echinata* LAM.) nativa e de reflorestamento. **Árvore**, Viçosa, v. 36, p. 373-380, 2012.

MARTINS, V.A. **Secagem de madeira serrada**. Brasília: IBDF, 1988. 56p.

MATRICARDI, W. A. T. **Efeitos dos fatores do solo sobre o desenvolvimento da teca (*Tectona grandis* L. f.) cultivada na Grande Cáceres – Mato Grosso**. 1989. 135f. Dissertação (Mestrado), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1989.

MELLADO, E. C. E. R. **Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de Pinus**. 2007. 155f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

MELO, J. R. **Secagem de madeiras**: teoria e prática de secagem artificial de madeiras. Lisboa: Estação Florestal Nacional, 1999.

MILOTA, M. R.; TSCHERNITZ, J. L. Correlation of loblolly pine drying rates at high temperature. **Wood and Fiber Science**, Hanover, v. 22, n. 3, p. 298–313, 1990.

MIRANDA, I.; SOUSA, V.; PEREIRA, H. Wood properties of teak (*Tectona grandis*) from a mature unmanaged stand in East Timor. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 57, n. 3, p. 171-178, 2011.

MORENO, J. R.; ROQUE, R. M. Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Tectona grandis* Linn. F. (teca), proveniente de una plantación de ocho años de edad em Cochabamba, Bolivia. **Kurú Revista Forestal**, San José, v. 3, n. 9, p. 1-14, 2006.

MOTTA, J. P. **Propriedades tecnológicas da madeira de *Tectona grandis* L. f. proveniente do vale do rio doce, Minas Gerais**. 2011. 126f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2011.

MOTTA, J. P.; OLIVEIRA, J. T. S.; PAES, J. B.; ALVES, R. C.; DAMBROZ, G. B. V. Resistência natural da madeira de *Tectona grandis* em ensaio de laboratório. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, p. 1393-1398, 2013.

MOYA, R.; BERROCAL, A.; SERRANO, J. R.; TOMAZELLO FILHO, M. Variación radial de la anatomía, densidad y durabilidad de la madera de teca (*Tectona grandis*) procedente de dos calidades de sitio y dos regiones climáticas de Costa Rica. **Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales**, Madrid, v. 18, n. 2, p.119-131, 2009.

OLIVEIRA, J. T. S. Propriedades físicas e mecânicas da madeira. In: José Tarcísio da Silva Oliveira, Nilton César Fiedler, Marcelo Nogueira. (Org.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro**. Visconde do Rio Branco: Suprema Gráfica e Editora Ltda, 2007, v. 1, p. 271-366.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Árvore**, Viçosa, v.29, n.1, p.115-127, 2005.

OLIVEIRA, J. T. S.; LUCIA, R. M. D.; VITAL, B. R. Estudo das propriedades físicas e tecnológicas da madeira da pindaíba (*Xylopia sericea* St. Hil.). IV - Densidade, Umidade e Secagem da Madeira. **Árvore**, Viçosa, v. 14, n.2, p. 139-154, 1990.

OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M; FIEDLER, N. C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Árvore**, Viçosa, v.34, n.5, p.929-936. 2010.

OLIVEIRA, L. C. S. **Perguntas e respostas em secagem de madeiras**. São Paulo: IPT, 1981. 36p.

OLIVEIRA, L. S.; SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R. Efeitos de pré-tratamentos de água quente e congelamento na taxa de secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 10, n. 2, p. 11-18, 2003.

PAES, J. B.; LOIOLA, P. L.; CAPELINI, W. A.; SANTOS, L. L.; SANTOS JUNIOR, H. J. G. Entomofauna associada a povoamentos de teca localizados no sul do Estado do Espírito Santo. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, p. 125-132, 2014.

PAES, J. B.; MELO, R. R.; LIMA, C. R. Resistência natural de madeiras a fungos xilófago em condições de laboratório. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, n.47, p.199-210, 2007.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Text book of wood technology**. 4 ed. New York: MacGraw-Hill, 1980. 722 p.

PONCE, R. H.; WATAI, L. T. **Secagem da madeira**. Instituto de Pesquisa Tecnológica. Brasília: STI/IPT, 1985. 72p. (Série documentos, 22).

PRATT, G. H. **Timber drying manual**. London: Department of the Environment/Building Research Establishment, 1974. 152p.

RASMUSSEN, E. F. **Dry kiln operator's manual**. Madison: USDA, Forest Service, 1961. 197p.

ROCHA, R. B.; VIEIRA, A. H.; SPINELLI, V. M.; VIEIRA, J. R. Caracterização de fatores que afetam a germinação de teca (*Tectona grandis*): temperatura e escarificação. **Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 205-212. 2011.

ROWELL, R. M. **The chemistry of solid wood**. Washing, D. C., American Chemical Society, 1984, 614 p.

ROWELL, R. M. **Chemical modification of wood**. In: R. M. Rowell, ed., Handbook of wood chemistry and wood composites. Taylor and Francis, Boca Raton, FL. Ch. 14, p. 381 – 420, 2005.

SALAMON, M.; MCLNTYRE, S. Manipulation of Air Velocity Permits Drying Time Savings. Canadian Forest Industries, v, 89, n .9, p. 49-57, 1969.

SALAMON, M.; MCLNTYRE, S. Manipulation of Air Velocity Permits Drying Time Savings. Canadian Forest Industries, v, 89, n .9, p. 49-57, 1969.

SANTINI, E. J. **Alternativas para monitoramento e controle do processo de secagem de madeira serrada em estufa**. Curitiba, 1996. 198f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, 1996.

SANTINI, E. J. **Influência da temperatura na taxa de secagem e contração da madeira de *Pinus elliottii* proveniente de plantios de rápido crescimento**. Curitiba, FUPEF, Série Técnica, 1980. 16p.

SANTINI, E. J. Métodos de secagem de madeira. In: I SEMINÁRIO SOBRE SECAGEM DE MADEIRA, 1., 1992, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, 1992. p. 47-59.

SANTINI, E. J. Temperatura da madeira como alternativa de controle do processo de secagem, **Cerne**, Lavras, v. 6, n. 2, p. 112 – 121, 2000.

SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R. Efeito da temperatura e velocidade do ar sobre a taxa de secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 99-106. 2002.

SANTINI, E. J.; TOMASELLI, I. Colapso na madeira de algumas experiências brasileiras. **Série Técnica, FUPEF**, Curitiba, n.3, p. 1-21, 1980.

SANTOS, G. R. V.; JANKOWSKY, I. P.; ANDRADE, A. Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 63, p.214-220, 2003.

SCHAFFER, E. L. Effect of pyrolytic temperatures on the longitudinal strenght of dry douglas fir. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 1, n. 4, p. 319-329, 1973.

SCHUBERT, T. H. *Tectona grandis*, teak. In: SCHOPMEYER, C. S. (Coord.). **Seeds of woody plants in the United States**. Washington, DC.: USDA Forest Service, 1974. P. 803 – 804. (Agricultural Handbook, 450).

SCHUHLIL, G. S.; PALUDZYSZYN FILHO, E. O cenário da silvicultura de teca e perspectivas para o melhoramento genético. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 63, p. 217–230, 2010.

SEVERO, E. T. D. **Efeito da temperatura e da velocidade do ar na secagem de madeira serrada de *Pinus Elliotii***. 1989. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

SHIMIZU, J.Y.; KLEIN, H; OLIVEIRA, J.R.V. de Diagnóstico das plantações florestais em Mato Grosso. Cuiabá, MT: **Central de Texto**, 2007.

SIAU, J. F. **Transport process in wood**. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 245 p.

SIAU, J. F.; AVRAMIDIS, S. The Surface Emission Coefficient of Wood. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.28, n.2, p.178-185, 1996.

SILVA, M. R. **Determinação da permeabilidade em madeiras brasileiras de florestas plantadas**. 2007. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais). Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos. 2007.

SILVA, J. R. M.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M.; LUCIA, R. M. D.; CAIXETA, J. **Produtos utilizados no setor de acabamento de móveis de madeira - Características e técnicas de aplicação** - Boletim Técnico. Lavras/MG: Editora UFLA, 2002 (Boletim técnico).

SILVEIRA, L. H. C.; REZENDE, A. V.; VALE, A. T. Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 43, n. 2, p. 179 – 184, 2013.

SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual**. Madison: U.S. Department of Agriculture, 1991. 274p.

SIMPSON, W. T. **Effect of air velocity on the drying rate of single eastern white pine boards**. USDA Forest Service, Research Note FPL-RN-266, 1997, 5p.

SIMPSON, W. T. **Method to estimate dry-kiln schedules and species groupings: Tropical and temperate hardwoods**. Madison, WI: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1996, 57p.

SKAAR, C. **Wood-water relation**. New York: Springer-Verlag. 1988. 283p.

STAMM, J. A. **Wood and cellulose science**. New York, The Ronald Press, 1964. 549p.

STCP - ENGENHARIA DE PROJETOS Ltda. **Secagem de madeiras serradas**. Curitiba: 1990. 68p.

SUSIN, F. **Avaliação de programas de secagem para madeiras de eucalipto elaborados com base em testes prévios a alta temperatura**. 2012. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

SZÜCS, C. A.; TEREZO, R. F.; VALLE, Â.; MORAES, P. D. **Estruturas de madeira**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2006. 186p.

TERAZAWA, S. Methods for easy determination of kiln drying schedule of wood. **Wood Industry**, v.20, n.5, 1965.

TOMASELLI, I. **Effect of high temperature drying on properties of *Pinus radiata***. 1977. 264f. Tese (Doutorado em Wood Science), University of Melbourne, Melbourne. 1977.

TOMASELLI, I. **Aspectos físicos da secagem de madeira de *Pinus elliottii* Engelm. acima de 100°C**. 1981. 128 f. Tese (Livre Docência em Engenharia e Tecnologia Rurais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1981.

TREVISAN, R.; HASELEIN, C. R.; MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M.; BELTRAME, R.; GATTO, D. A.; CALEGARI, L. Variação radial da massa específica básica da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, p.553-559, 2008.

TRIANOSKI, R.; MATOS, J. L. M.; IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de espécies de Pinus Tropicais. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 3, p. 503 - 510, 2013.

TSUKAMOTO FILHO, A. A; SILVA, M. L.; COUTO, L.; MULLER, M. D. Análise econômica de um plantio de teca submetido a desbastes. **Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 487 – 494, 2003.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE FOREST SERVICE - USDA FOREST SERVICE. **Wood Technology Transfer Fact Sheet – *Tectona grandis* (Teak)**. Center for wood anatomy research. Research and Development: Forest Products Laboratory, Madison. 2010. Disponível em:



<[http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/TechSheets/Chudnoff/SEAsian\\_Oceanic/htmlDoc\\_SEAsian/tectonagrandis.html](http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/TechSheets/Chudnoff/SEAsian_Oceanic/htmlDoc_SEAsian/tectonagrandis.html)>. Acesso em: 17 ago. 2014.

VIEIRA, A. H.; MARTINS, E. P.; PEQUENO, P. L. L.; LOCATELLI, M. **Aspectos silviculturais da teca em Rondônia**. Porto Velho: Embrapa CPAF, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2002. Documentos, n. 68).

WASSIPPAUL, F. **Holztechnologie**: Vorlesungsmitschrift. Univ. Fur. Bodenkultur. Wien, 1977.

WENGERT, E. M.; DENIG, J. Lumber drying: today and tomorrow. **Forest Products Journal**. Madison, v. 45, n. 5, p. 22 – 30, 1995.

## CAPÍTULO 1 – ELABORAÇÃO DE PROGRAMAS DE SECAGEM PARA MADEIRAS DE TECA (*Tectona grandis* L. f.)

### RESUMO

Programa de secagem é uma sequência de combinações de temperatura e umidade relativa que são manuseadas ao longo do processo de secagem. Para a condução do processo de secagem de forma adequada, é necessário a elaboração de curvas de secagem (programas de secagem) que se adequem às características intrínsecas a espécie, assim como, atender as especificações do produto final a ser manufaturado. Este estudo teve por objetivo testar duas metodologias para o desenvolvimento de programa de secagem para madeiras de teca (*Tectona grandis*). Foram avaliadas as propriedades físicas e químicas da madeira para posteriormente elaborar as curvas de secagem em função das metodologias testadas, as quais, foram baseadas na secagem drástica a 100°C e na massa específica básica da madeira. Os parâmetros de comparação foram a temperatura inicial, final e o potencial de secagem. As temperaturas iniciais de secagem diferiram-se estatisticamente entre as metodologias avaliadas, no entanto, a temperatura final de secagem são semelhantes entre ambas. O potencial de secagem, com base na secagem drástica da madeira, mantém-se constante praticamente ao longo de todo o processo de secagem, enquanto, a metodologia com base na massa específica básica, possui um potencial mínimo para a remoção da água capilar e eleva-se de forma gradativa para a remoção da água de difusão, sendo na média superior. A madeira de teca, possui elevada estabilidade dimensional, não apresentando incidência de defeitos durante a elaboração dos programas de secagem.

Palavras-chave: Secagem drástica. Massa específica. Estabilidade dimensional. Propriedades química. Taxa de secagem.

## ABSTRACT

The drying program is a combination sequence of temperature and relative moisture that are managed along the drying process. To conduct a drying process correctly, is necessary to elaborate the drying curves (drying programs) that are best suited to the intrinsic characteristics of the species, and the specifications of the final product. The objective of this study was to test two methods develop a drying program of wood of *Tectona grandis*. The physical and chemical properties of this wood were evaluated to make the drying curves, based in the methods tested, that was based on drastic drying (100°C) and the specific gravity of the wood. The benchmarks were the initial temperature, final and potential of drying. Initial temperature drying differ between the tested methodologies, however, the final drying temperature are similar. The drying potential based on drastic drying of wood keeps practically constant throughout the drying process, while, the methodology based on the specific gravity, has a minimal potential for removing the capillary water and increases gradually to the diffusion of water removal, being in average higher. The teak wood, has high dimensional stability not with an incidence of defects during the development of drying programs.

Keywords: Drastic drying. Specific gravity. Dimensional stability. Chemical properties. Drying rate.

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a teca (*Tectona grandis*) tem sido uma boa oportunidade de investimento, face à adaptação da cultura às condições edafoclimáticas em várias regiões. De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (Anuário..., 2014), a área total de plantios desta espécie no Brasil em 2013 era de 88.270 ha, distribuídos entre os Estados do Acre, Amapá, Mato Grosso do Sul, Paraná, Rondônia, São Paulo, Tocantins e, principalmente, Mato Grosso e Pará.

As propriedades físicas e mecânicas da madeira caracterizam-se pela facilidade de secagem e estabilidade dimensional, possibilitando estabelecê-la como um padrão para avaliar as madeiras de todas as outras espécies de folhosas. A massa específica básica da madeira de teca seca varia de 0,55 a 0,68 g.cm<sup>-3</sup>, (FIGUEIREDO et al., 2005).

A secagem adequada de madeiras caracteriza-se pelo processo de remoção de sua umidade, até valores pré estabelecidos, com a ocorrência mínima de defeitos, com o menor tempo possível e de uma forma economicamente viável para o uso a que se destina o seu produto final (MARTINS, 1988; ANDRADE et al., 2001). Para a condução do processo de secagem de forma adequada, é necessário a elaboração de curvas de secagem (programas de secagem) que se adequem às características intrínsecas a espécie, assim como, ao produto final desejado a ser manufaturado.

Programa de secagem é uma sequência de combinações de temperatura e umidade relativa que são manuseadas ao longo do processo de secagem, para atender as especificações do produto final a ser manufaturado. Na indústria, o programa de secagem é elaborado de forma empiricamente com base em conhecimentos prévios para madeiras comumente através técnica de tentativa e erro, ou elaborado de forma experimentalmente, para madeiras em que não se tem um conhecimento de suas propriedades anatômicas, físicas e químicas.

Um programa de secagem pode ser empregado com base nos descritos na literatura, assim como, desenvolvidos de forma específica para cada espécie, baseando-se em recomendações e diretrizes existente na própria literatura, sendo os mais comuns as descrições de Terazawa (1965); Brandão (1989); Simpson (1996); Ciniglio (1998); Jankowsky (2009).

Em função da dificuldade de elaboração de programas de secagem para madeiras, este fato tem motivado pesquisadores a desenvolver metodologias para a elaboração de curvas de secagem eficientes em menor tempo para atender as necessidades das indústrias madeireiras (TERAZAWA, 1965; BRANDÃO, 1989; SIMPSON, 1996; CINIGLIO, 1998; JANKOWSKY, 2009).

Brandão (1989) foi o precursor no desenvolvimento de uma metodologia para a indicação de programas de secagem no Brasil, sendo inspirado nos estudos de Terezawa (1965), o qual testou pequenas amostras, relacionando as ocorrências de rachaduras de topo e colapsos, submetidos a secagem drástica a 100°C para chegar a valores de temperatura inicial, temperatura final e potencial de secagem. Esta mesma metodologia foi empregada por Ciniglio (1998) em que se realizou algumas adaptações com o intuito de melhorar sua execução laboratorial, tornando-se o processo mais rápido, o que foi amplamente utilizada pela comunidade científica (ANDRADE et al., 2001; BARBOSA et al., 2005; KLITZKE; BATISTA, 2010; ELEOTÉRIO; SILVA, 2012; SUSIN, 2012, ARRUDA, 2014; ELEOTÉRIO; SILVA, 2014).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Testar duas metodologias para o desenvolvimento de programa de secagem para madeiras de teca (*Tectona grandis*).

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar as propriedades físicas e químicas da madeira de teca (*Tectona grandis*);

Determinar os parâmetros de temperatura inicial, temperatura final e o potencial de secagem para o desenvolvimento do programa de secagem da madeira de teca (*Tectona grandis*) de duas metodologias;

Comparar os parâmetros de temperatura inicial, temperatura final e o potencial de secagem entre as metodologias avaliadas.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

O material estudado é proveniente de um povoamento florestal homogêneo com idade de 20 anos, provenientes de sementes da Empresa Floresteca, localizado no município de Cuiabá, Mato Grosso, adquirido pela empresa TWBrazil situada no município de Ponta Grossa, Paraná, a qual cedeu o material para a realização desta pesquisa.

O desdobro das toras de teca (*Tectona grandis*) foi realizado em uma serraria localizada no município Cuiabá, Mato Grosso, classificada como pequeno porte, segundo a classificação de Vital (2008), onde o desdobro principal ocorreu em fita dupla formando-se um semi-bloco, posteriormente para obtenção de tábuas em serras circulares múltiplas.

Foram produzidas tábuas com dimensões de 104 x 25 x 1550 mm (largura x espessura x comprimento), sendo selecionadas 800 peças em função de seu aspecto fitossanitário, totalizando aproximadamente 3m<sup>3</sup> de madeira serrada.

Para o acondicionamento das madeiras a fim de minimizar a variação de umidade das tábuas e o ataque de organismos xilófagos, as mesmas foram alocadas em uma câmara fria a  $5 \pm 1$  °C (Figura 4), conforme indicações de Steinhagen (1974); Milota; Tschernitz (1990); Simpson (1997); Klitzke (2002). Sendo realizado o monitoramento da umidade das peças semanalmente.



FIGURA 4 - Tábuas de teca (*Tectona grandis*) alocadas na câmara fria a  $5 \pm 1$  °C

A cada etapa de realização da pesquisa foi retirada a quantidade necessária de tábuas da câmara fria mantendo-se a umidade e a sanidade do material.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DAS MADEIRAS

A determinação das propriedades físicas das madeiras de teca (*Tectona grandis*), foram realizadas conforme recomendações da Comision Panamericana de Normas Técnicas - COPANT (1972), enquanto, às propriedades químicas das madeiras seguiram as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2003) e da Technical Association of the Pulp and Paper Industry – TAPPI (1997).

#### 3.2.1 Massa específica básica e aparente

Os ensaios para a determinação da massa específica básica e aparente a (12%) das madeiras de teca (*Tectona grandis*), foram realizados conforme recomendações da COPANT – 461 (1972). Para tanto, foram utilizadas 35 repetições, tendo as amostras dimensões de 25 x 25 x 100 mm (radial x tangencial x longitudinal). As amostras foram acondicionadas em uma câmara climática a  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $65 \pm 3\%$  de umidade relativa até a estabilização de todas as amostras em 12% de umidade.

Para a determinação da massa seca, as amostras foram colocadas em estufa, de ventilação forçada a uma temperatura de  $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Para maior controle da secagem a perda de massa dos corpos de prova foi monitorada até peso constante.

#### 3.2.2 Retratibilidade da madeira

As deformações específicas da retração da madeira de teca (*Tectona grandis*) foram consideradas como índice de estabilidade dimensional, determinadas para cada um dos planos de orientações, em função de suas dimensões, observadas



quando a madeira se encontrava no estado saturado, a 12% de umidade e para a condição seca (0% de umidade).

A determinação da retratibilidade da madeira foi de acordo com as recomendações da COPANT – 462 (1972). Determinou-se a retração volumétrica, as retrações lineares, totais e parciais, ou seja, a retração nas direções radial, tangencial. Ao final foi determinado o fator anisotrópico total da madeira.

### 3.2.3 Caracterização química da madeira

Para a caracterização química, tábuas de teca (*Tectona grandis*), foram transformados em cavacos, os quais, foram reduzidos em serragem em moinho de facas tipo Wiley. A serragem foi classificada em peneiras manuais, sendo utilizadas para a determinação dos componentes químicos, as frações que passaram na peneira de 40 *mesh* e ficaram retidas na peneira de 60 *mesh*, conforme a Norma TAPPI 264 (1997). Após a classificação foi determinado o percentual de material absolutamente seco a fim de efetuar as devidas correções durante a execução das análises. Para cada análise realizada, procedeu-se uma triplicata e quando os valores divergiram em mais de 2%, realizou-se uma nova análise. As análises químicas realizadas foram:

- Solubilidade em Água Fria – TAPPI 207 (1999).
- Solubilidade em Água Quente – TAPPI 207 (1999).
- Extrativos Totais – NBR 14853 (2002) - Determinação do material solúvel em etanol:tolueno.
- Teor de Lignina Insolúvel - NBR 7989 (2003) - Determinação de lignina insolúvel em ácido.
- Teor de cinzas – TAPPI 211 (1993).
- Teor de Holocelulose – determinado por diferença, incluindo o teor de cinzas.

### 3.3 ELABORAÇÃO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM

Foram utilizadas duas metodologias distintas para a elaboração dos programas de secagem para a madeira de teca (*Tectona grandis*), afim de, verificar a existência de diferença entre as metodologias, assim como, qual metodologia melhor se adequa à espécie estudada.

Para a elaboração do programa com base nas metodologias descritas por Terazawa (1965), Brandão (1989); Ciniglio (1998) e Jankowsky (2009), denominada de secagem drástica, foram determinados os parâmetros da temperatura inicial de bulbo seco, temperatura final de bulbo seco e o potencial de secagem. O método de secagem drástica se baseia no princípio de que pequenas amostras quando expostas aos efeitos das radiações térmicas em estufa a 100 °C, sem ventilação forçada, proporcionam um comportamento semelhante na secagem em câmaras convencionais.

Já a elaboração do programa com base na metodologia descrita por Simpson (1996), em que se utiliza a massa específica básica da madeira para a determinação dos parâmetros de temperatura inicial do bulbo seco ( $T_i$ ), depressão psicrométrica ( $D_i$ ) e potencial de secagem (PS).

#### 3.3.1 Preparo do material

Para determinação dos programas de secagem, foram utilizadas 10 tábuas sendo amostradas peças aleatórias levando em consideração seu aspecto fitossanitário. Para cada tábua foram confeccionadas 5 amostras nas dimensões de 50 x 10 x 150 mm (largura x espessura x comprimento), totalizando 50 amostras a serem escolhidas para a elaboração dos programas secagem acelerado, conforme ilustra a Figura 5.

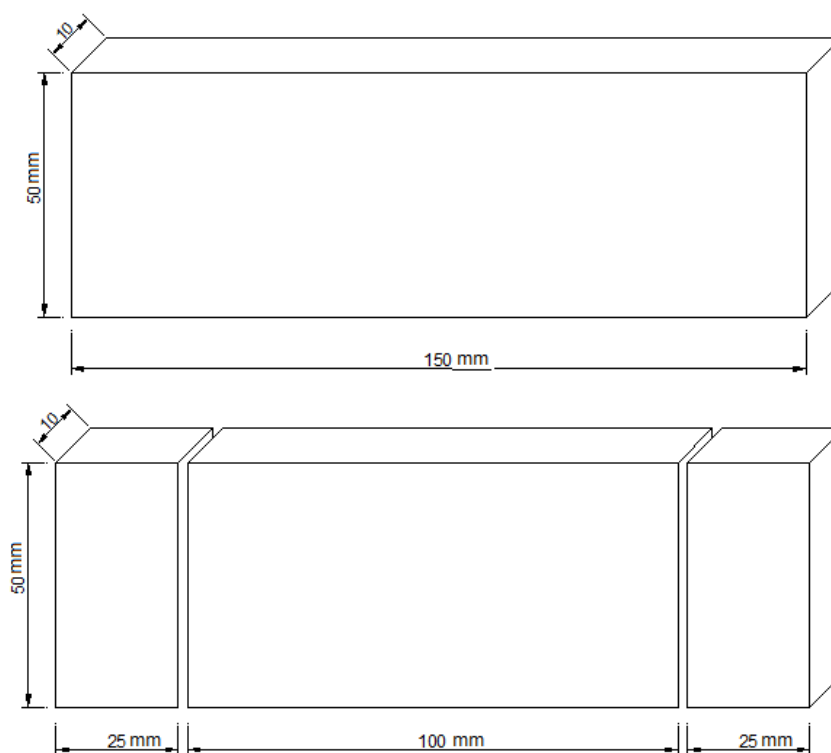


FIGURA 5 - Amostra para realização do programa de secagem

Para a elaboração do programa denominada de secagem drástica foram selecionadas 19 amostras. A elaboração do programa de secagem com base na massa específica básica da madeira, foram selecionadas 10 amostras. Na experimentação para minimizar os efeitos referentes à saturação do interior da estufa, foram alocadas 5 amostras por ciclo.

Ressalta-se que nas amostras destinadas à secagem drástica os topos foram impermeabilizados com acetato de polivinila, evitando a perda excessiva de umidade no sentido longitudinal das fibras. Para as amostras destinadas à elaboração do programa com base na massa específica básica, não sofreram intervenções como o ocorrido para a secagem drástica.

### 3.3.2 Determinação do teor de umidade inicial

Para a determinação do teor de umidade inicial das amostras para elaboração dos programas de secagem de ambas as metodologias foram empregadas o método gravimétrico, descrito em diversos manuais de secagem (RASMUSSEN, 1961; PRATT, 1974; GALVÃO; JANKOWSKY, 1985); onde as amostras úmidas foram submetidas à secagem em estufa a  $103^{\circ}\text{C} \pm 2$  até massa constante, conforme

recomendações da Norma Brasileira Regulamentadora – NBR (7190) da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1997).

### 3.3.3 Variáveis utilizadas para a elaboração do programa de secagem drástica

#### 3.3.3.1 Cálculo da velocidade de secagem

O cálculo da velocidade da secagem foi realizado como base teórica a metodologia de Terazawa (1965); Brandão (1989) com algumas modificações realizadas por Ciniglio (1998) e Jankowsky (2009).

As amostras foram pesadas em balança digital de precisão de 0,01g, para determinação da massa inicial e com auxílio de paquímetro digital (0,01 mm) aferiu-se suas dimensões em largura, espessura e comprimento sendo realizadas as medições periodicamente de 1 em 1 hora do ensaio, durante as primeiras 12 horas. Após esse período, as medições foram realizadas a cada 2 horas até o término do ensaio.

O cálculo da velocidade de secagem foi determinado desde a condição verde da madeira até 30% de umidade (taxa capilar); de verde até 5% de umidade (taxa capilar e higroscópica) e de 30 até 5% de umidade (taxa higroscópica). Para tanto, foram utilizadas as Equações 6; 7 e 8:

- i) Velocidade de secagem da condição verde até o 30%.

$$V1 = \frac{Mv - M_{30\%}}{T1 * \text{área}} \quad (6)$$

Em que:

$V1$  = Velocidade de secagem da condição verde até o 30% de umidade  $[g \cdot (cm^2 \cdot hora)^{-1}]$ ;

$Mv$  = Massa úmida [g];

$M_{30\%}$  = Massa a 30% de umidade [g];

$T1$  = Tempo de secagem da condição verde até 30% [horas];

EQUAÇÃO 6 - Velocidade de secagem da condição verde até o 30%

ii) Velocidade de secagem da condição verde até 5%.

$$V2 = \frac{Mv - M5\%}{T2 * \text{área}} \quad (7)$$

Em que:

$V2$  = Velocidade de secagem da condição verde até 5% de umidade [ $\text{g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{hora})^{-1}$ ];

$Mv$  = Massa úmida [g];

$M_{5\%}$  = Massa a 5% de umidade [g];

$T_2$  = Tempo de secagem de verde até 5% de umidade [horas];

EQUAÇÃO 7 - Velocidade de secagem da condição verde até 5%

iii) Velocidade de secagem de 30 até 5% de umidade.

$$V3 = \frac{M30\% - M5\%}{T3 * \text{área}} \quad (8)$$

Em que:

$V3$  = Velocidade de secagem de 30 até 5% de umidade [ $\text{g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{hora})^{-1}$ ];

$M_{30\%}$  = Massa a 30% de umidade [g];

$M_{5\%}$  = Massa a 5% de umidade [g];

$T_3$  = Tempo de secagem do 30 até 5% de umidade [horas];

EQUAÇÃO 8 - Velocidade de secagem de 30 até 5% de umidade

A estimativa da massa seca (0% de umidade) das amostras foi determinada com base na Equação 9.

$$Me0\% = \frac{Mu * 100}{U + 100} \quad (9)$$

Em que:

$Me0\%$  = Massa estimada a 0% de umidade [g];

$Mu$  = Massa úmida [g];

$U$  = Umidade da amostra (%).

EQUAÇÃO 9 - Estimativa da massa seca (0% de umidade)

### 3.3.3.2 Parâmetros para elaboração do programa

As variáveis relacionadas aos ensaios para a elaboração dos programas de secagem drástica (Tabela 1), juntamente com foram aplicados nas equações (Tabela 2). Definindo desta forma os principais parâmetros dos programas de secagem, como a temperatura inicial (TI), a temperatura final (TF) e o potencial de secagem (PS).

As equações 7; 8 e 9, auxiliaram nos cálculos da velocidade de secagem para cada fase da remoção de umidade da madeira, as quais, foram empregadas para a determinação dos parâmetros de secagem (Tabela 2).

TABELA 1 - VARIÁVEIS RELACIONADAS AO ENSAIO DA VELOCIDADE DE SECAGEM ACELERADA

Variável	Descrição	Umidade	Unidade
Ui	Umidade inicial	Verde	%
T1	Tempo de secagem	Verde a 30%	Hora
T2	Tempo de secagem	30 a 5%	Hora
T3	Tempo de secagem	Verde a 5%	Hora
V1	Velocidade de secagem	Verde a 30%	$\text{g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{hora})^{-1}$
V2	Velocidade de secagem	30 a 5%	$\text{g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{hora})^{-1}$
V3	Velocidade de secagem	Verde a 5%	$\text{g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{hora})^{-1}$
R1	Rachadura de topo	Verde a 30%	adimensional
R2	Rachadura de topo	30 a 5%	adimensional
R3	Rachadura topo	Verde a 5%	adimensional

Fonte: Ciniglio (1998); Jankowsky (2009).

TABELA 2 - EQUAÇÕES PARA DETERMINAR OS PARÂMETROS DA SECAGEM CONVENCIONAL DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*)

Parâmetro	Equação			
<b>TI</b>	27,9049 +	0,7881 * T2 +	419,0254 V1 +	1,9483 * R2
<b>TF</b>	49,2292 +	1,1834 * T2 +	273,8685 V2 +	1,0754 * R1
<b>PS</b>	1,4586 -	30,4418 * V3 +	42,9653 * V1 +	0,1424 * R3

Fonte: Ciniglio (1998); Jankowsky (2009).

### 3.3.4 Variáveis utilizadas para a elaboração do programa com base na massa específica básica

Para os programas de secagem elaborados segundo o método proposto por Simpson (1996), foi utilizada a massa específica básica determinada nas mesmas amostras utilizadas para a elaboração do programa para esta metodologia empregada.

O método proposto por Simpson (1996) se baseia na massa específica básica como parâmetro para a definição da temperatura inicial ( $T_i$ ) e depressão psicrométrica inicial ( $D_i$ ) com base nas equações da Tabela 3.

TABELA 3 - EQUAÇÕES PARA DETERMINAR OS PARÂMETROS DE TEMPERATURA INICIAL, DEPRESSÃO PSICROMÉTRICA E O POTENCIAL DE SECAGEM

Parâmetro	Equação
<b>Ti</b>	$(0,0115 + 0,0167 * \rho_{\text{básica}})^{-1}$
<b>Di</b>	$(0,0832 + 0,509 * \rho_{\text{básica}})^{-1}$
<b>PS</b>	$TU_{\text{atual}} * (UE)^{-1}$

Nota:  $T_i$ : Temperatura inicial.  $D_i$ : depressão psicrométrica. TU: teor de umidade. UE: Umidade de equilíbrio.

FONTE: Simpson (1996), modificado.

As temperaturas de bulbo seco foram mantidas constantes até que a madeira alcançasse 30% de umidade, em seguida foram elevadas gradativamente, juntamente com a depressão psicrométrica calculada para cada 5% de redução no teor de umidade.

O cálculo do potencial de secagem é obtido com a elaboração da curva de secagem, sendo determinado para cada faixa de umidade em que se encontra a madeira.

### 3.4. ESCORE DE DEFEITOS DOS ENSAIOS PARA A ELABORAÇÃO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM

A análise dos defeitos gerados nas amostras foi avaliada em níveis de rachaduras de topo e de superfície. Ao término do ensaio, foram realizadas avaliações finais dos defeitos, assim como, as rachaduras internas e o colapso gerado. Todos os defeitos foram avaliados levando-se em conta a maior magnitude, com a utilização de um paquímetro digital (0,01 mm de precisão). As rachaduras de superfície foram avaliadas quanto ao comprimento e largura (mm), seguindo as recomendações NBR 14806:2002 (Madeira serrada de eucalipto – Requisitos).

As rachaduras de topo e internas foram avaliadas com o auxílio de um paquímetro digital (0,01 mm) além de um calibrador de folga para a mensuração de sua largura. Sendo a análise das rachaduras internas, realizadas a partir de cortes transversais equidistantes nas amostras, com serra circular, gerando quatro faces para avaliação (Figura 6).

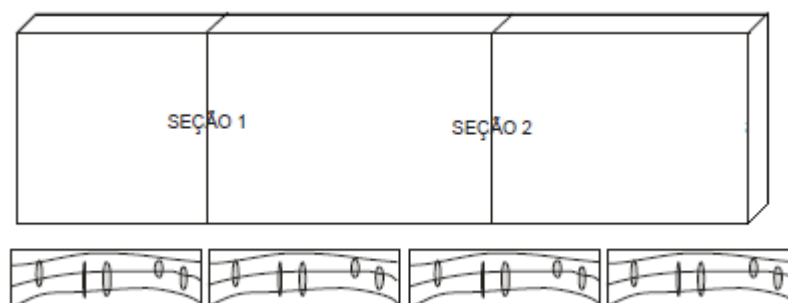


FIGURA 6 - Avaliação das rachaduras internas

FONTE: Batista (2009), modificado.

Para a avaliação do defeito do tipo colapso, primeiramente foram identificadas as amostras que apresentavam este tipo de defeito. Em seguida, tomados as medidas em espessura das amostras ensaiadas, a menor espessura nas amostras ensaiadas, levando sempre em consideração a ocorrência mais severa deste tipo de defeito (Figura 7). Sendo o grau de deformação calculado de acordo com as recomendações de Galvão; Jankowsky (1985).



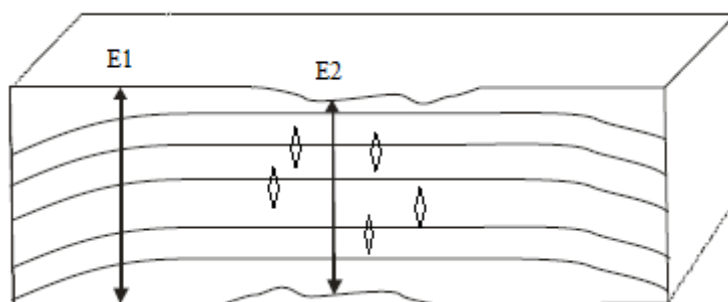


FIGURA 7 - Mensuração do colapso

FONTE: Batista (2009), modificado.

A determinação do colapso foi realizada pela diferença de espessuras da amostra, sempre considerando a menor espessura da amostra (Equação 10). As amostras que apresentaram este defeito foram resserradas conforme ilustrado na Figura 7, para verificação da ocorrência de rachaduras internas.

$$\text{Colapso} = E1 - E2 \quad (10)$$

Em que:

Colapso = grau de deformação do colapso (mm);

E1 = maior espessura (mm);

E2 = menor espessura (mm).

EQUAÇÃO 10 - Determinação do colapso na madeira

A incidência de defeitos do ensaio da velocidade de secagem foi transformada em escores (Tabela 4).

TABELA 4 - ESCORE DE DEFEITOS ATRIBUÍDOS AS AMOSTRAS APÓS OS ENSAIOS PARA A ELABORAÇÃO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM

Escore defeitos	Rachadura Topo (mm)	Rachadura Superfície (mm)	Rachadura Interna (mm)	Colapso (mm)
Nota 1	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Nota 2	CR<5,0 e LR< 0,5	CR<25 e LR<0,25	CR<2,5 e LR<0,5	e<0,25
Nota 3	CR>5,0 e LR<0,5	CR<50 e LR<0,5	CR>2,5 e LR<0,5	0,25>e<0,5
Nota 4	CR<5,0 e 0,5>LR>1,0	CR<75 e LR<1,0	CR>2,5 e LR>0,5	0,5>e<1,0
Nota 5	CR>5,0 e 0,5>LR<1,0	CR>75 e LR>1,0	-	e>1,0
Nota 6	CR>5,0 e LR>1,0	-	-	-

Nota: CR = comprimento da rachadura. LR = largura da rachadura. e = espessura da amostra.

FONTE: Ciniglio (1998).

### 3.5 RETRAÇÃO DA MADEIRA PARA OS PROGRAMAS DE SECAGEM

Foi determinada a retração das amostras ensaiadas para a elaboração do programa de secagem, referente às duas metodologias estudadas, sendo determinada a retração volumétrica da madeira, conforme Equação 11.

$$\text{Retração (V)} = \frac{\text{Dimensão verde (V)} - \text{Dimensão seca (V)}}{\text{Dimensão verde (V)}} * 100 \quad (11)$$

EQUAÇÃO 11 - Retração da madeira para os programas de secagem

### 3.6 ANÁLISE E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Para análise e avaliação dos resultados, procederam-se análises de variância e nas situações em que a hipótese de nulidade (H0) foi rejeitada, aplicou-se o Teste de Tukey (5%) para a diferenciação das médias.

Com intuito de ilustrar a relação entre as variáveis envolvidas, procedeu-se uma análise de regressão, selecionando o modelo que apresentou o melhor ajuste, levando-se em consideração o coeficiente de determinação e o erro padrão da estimativa.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICA DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*)

Observa-se (Tabela 5) que as madeiras de teca tiveram massa específica básica de  $0,47 \text{ g.cm}^{-3}$ , enquanto à massa específica aparente a 12% foi de  $0,56 \text{ g.cm}^{-3}$ . Segundo a classificação sugerida por Carvalho (1996), as madeiras de teca podem ser classificadas como madeiras leves, mesma classificação sugerida de acordo com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA (2014), que classifica as madeiras como leve (densidade básica  $< 0,50 \text{ g.cm}^{-3}$ ), médias (densidade básica de  $0,51$  a  $0,72 \text{ g.cm}^{-3}$ ) e pesadas (densidade básica  $> 0,73 \text{ g.cm}^{-3}$ ).

TABELA 5 - MASSA ESPECÍFICA BÁSICA E APARENTE A 12% DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*)

Espécie	Massa específica básica ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	Massa específica aparente 12% ( $\text{g.cm}^{-3}$ )
Média	0,47	0,56
DP	0,02	0,03
CV (%)	4,83	4,97

Nota: DP: desvio padrão. CV: coeficiente de variação.

Os valores obtidos para a massa específica básica das madeiras foram inferiores aos valores de referência disponíveis pelo Forest Products Laboratory (FPL, 2010) para a espécie ( $0,55 \text{ g.cm}^{-3}$ ), valores estes idênticos aos encontrados por Moya et al. (2009) enquanto, Govaere et al. (2003), estudando madeiras de teca de diferentes idades originárias da Costa Rica, encontrou valores de massa específica básica de  $0,50$ ;  $0,58$  e  $0,61 \text{ g.cm}^{-3}$ , respectivamente para as idades de 8; 17 e 28 anos, ficando evidente que a formação de madeira adulta pela árvore, proporciona o aumento desta propriedade física.

Gutiérrez et al. (2008), ao estudarem madeiras de teca provenientes das localidades de Quevedo e Balzar, obtiveram massa específica básica de  $0,48$  e  $0,52$

g.cm<sup>-3</sup>, respectivamente. Outro estudo de madeiras provenientes da Costa Rica, realizado por Roque; Ledezma (2003), apresentaram valores de 0,52 g.cm<sup>-3</sup>. Valero et al. (2005) estudando madeiras de teca provenientes do Estado de Barinas na Venezuela, encontrou valores de 0,55 g.cm<sup>-3</sup>, para madeiras de 20 anos, enquanto, Moreno; Roque (2006) obtiveram valores de 0,50 g.cm<sup>-3</sup> para madeiras de 8 anos de árvores oriundas da Bolívia, já madeiras provenientes da Colômbia, Betancour et al. (2000) apresentaram valores de 0,55 g.cm<sup>-3</sup>, estudando madeiras de 13 anos.

Estudos com madeiras de teca no Brasil são recentes, mas podemos citar valores de massa específica básica de estudos realizados por Lima et al. (2009) o qual encontraram valores de 0,62 a 0,66 g.cm<sup>-3</sup> dependendo do espaçamento utilizado no plantio, enquanto, Motta (2011) estudando madeiras de 17 anos, provenientes da região do Vale do Aço, Minas Gerais, obteve valores de 0,54 g.cm<sup>-3</sup>. Chagas et al. (2014) encontraram valores de 0,51; 0,50 e 0,52 g.cm<sup>-3</sup> para madeiras com idades de 4; 6 e 12 anos respectivamente.

A massa específica da madeira pode ser considerada como resultante da interação das propriedades anatômicas e química da madeira. Panshin; DeZeeuw (1980) ainda complementam que as variações da densidade são provenientes das diferenças nas dimensões celulares, assim como, pela quantidade de extrativos presentes por unidade de volume na madeira.

Para a massa específica aparente a 12% de umidade, as madeiras de teca tiveram valores de 0,56 g.cm<sup>-3</sup>, valores estes, não destoantes dos encontrados na literatura para a espécie.

Wanneng et al. (2014) estudando madeiras de teca de diferentes idades, encontrou valores de massa específica aparente a 12% de 0,69 e 0,66 g.cm<sup>-3</sup>, respectivamente para as idades de 15 e 25 anos. Kokutse et al. (2004) estudando madeiras de teca provenientes do Continente Africano, obtiveram valores de 0,65 g.cm<sup>-3</sup>, para madeiras entre 11 e 16 anos, enquanto, Flórez et al. (2014) estudando madeiras de jovens de teca, encontraram valores de 0,54 g.cm<sup>-3</sup>.

É importante ressaltar que a massa específica aparente da madeira é influenciada sobretudo pela idade das árvores em questão, do espaçamento utilizado e pelo teor de umidade.

Observa-se (Tabela 6) que as madeiras de teca (*Tectona grandis*) tiveram valores de retração parcial (12% de umidade) de 0,81; 1,98; 0,19 e 2,98%, respectivamente para os sentidos radial, tangencial, axial, e volumétrico. Os

resultados obtidos neste estudo condizem com os demais estudos descritos na literatura para a espécie, porém inferiores aos resultados obtidos por Flórez et al. (2014) que encontraram a valores de 1,17; 2,30; 3,57%, respectivamente para os sentidos radial, tangencial e volumétrico da madeira.

TABELA 6 - RETRAÇÃO PARCIAL (12% DE UMIDADE) E TOTAL DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*) E FATOR ANISOTRÓPICO

Espécie	Retração parcial (12% de umidade) %				
	Radial	Tangencial	Axial	Volumétrico	FA
Média	0,81	1,98	0,19	2,98	-
DP	0,18	0,42	0,12	0,49	-
CV (%)	22,19	21,12	55,33	16,52	-
Espécie	Retração total da madeira %				
	Radial	Tangencial	Axial	Volumétrico	FA
Média	1,99	3,81	0,51	6,21	1,91
DP	0,27	0,52	0,17	0,61	0,35
CV (%)	13,50	13,52	32,25	9,78	18,03

Nota: DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; FA: fator anisotrópico.

Wanneng et al. (2014) obtiveram para quatro idades distintas de madeiras, valores de 1,52; 2,72; 0,18 e 4,42% (radial, tangencial, axial e volumétrico) para a retração parcial a 12% de umidade em madeiras com idade de 10 anos, já para as madeiras de 15 anos os resultados encontrados foram de 1,48; 2,68; 0,20 e 4,36% (radial, tangencial, axial e volumétrico). Enquanto, às madeiras de 20 anos tiveram retração de 1,54; 2,75; 0,16 e 4,45% (radial, tangencial, axial e volumétrico) e as madeiras de 25 anos os autores apresentaram resultados de 1,51; 2,71; 0,14 (radial, tangencial, axial e volumétrico). Independentemente da idade estudada pelos autores os resultados para a retração da madeira foram sempre superiores os obtidos por esta pesquisa.

Para a retração total da madeira observa-se (Tabela 6) valores de 1,99; 3,81; 0,51 e 6,21%, respectivamente para as retrações radial, tangencial, axial e volumétrico, tendo o fator anisotrópico de 1,91. Ressalta-se o baixo valor para a retração volumétrica da madeira (6,21%), assim como, para o fator anisotrópico (1,91), podendo predizer a baixa incidência de defeitos no processo de secagem da madeira.

Os valores de retração obtidos neste estudo corroboram com os estudos de Gutiérrez et al. (2008) estudando madeiras provenientes de Quevedo, obtiveram retração das madeiras de teca de 2,04; 5,66; 0,41 e 8,11%, respectivamente para os sentidos radial, tangencial, axial e volumétrico, no entanto, para o fator anisotrópico as madeiras de teca tiveram valor de 2,77. As madeiras de teca oriundas de Balzar, tiveram retração radial, tangencial, axial e volumétrica de 2,06; 5,22; 0,49 e 7,77%, respectivamente, enquanto o fator anisotrópico de 2,63 em estudos feitos por Gutiérrez et al. (2008). Roque; Ledezma (2003) obtiveram valores de 2,49; 5,42 e 7,14%, respectivamente para os sentidos radial, tangencial e volumétrico, com fator anisotrópico de 2,17.

Em estudos com madeiras da mesma espécie de povoamentos nacionais, verifica-se os valores obtidos por Motta (2011) para a retração radial, tangencial, axial e volumétrico de 2,06; 4,09; 0,29 e 6,33%, respectivamente, tendo como fator anisotrópico (2,02). Pinto (2007), obteve valores de 2,56; 3,26 e 5,82% (radial, tangencial e volumétrica) e fator anisotrópico de 1,27 para madeiras de 5 anos, enquanto para madeiras de 10 anos o autor apresentou valores de 3,31; 3,89 e 7,20 (radial, tangencial e volumétrico) tendo o fator anisotrópico de 1,17, valores estes bem abaixo dos descritos pela literatura. IPT (2010), obteve valores de 2,1; 4,6 e 6,7%, respectivamente para as contrações totais radial, tangencial e volumétrica, com fator anisotrópico de 2,19.

Observa-se (Tabela 7) que as madeiras de teca (*Tectona grandis*) tiveram em sua composição química, teores de 56,29; 31,62; 11,13 e 0,97%, respectivamente para os componentes de holocelulose, lignina, extrativos totais e cinzas.

TABELA 7 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*)

Espécie	Componentes químicos da madeira (%)			
	Holocelulose	Lignina	Extrativos totais	Cinzas
Média	56,29	31,62	11,13	0,97
DP	0,36	0,62	0,21	0,04
CV (%)	0,64	1,95	1,90	4,54

Nota: Extrativos totais: somatório da solubilidade em água quente, água fria e etanol/tolueno (2:1).

DP: desvio padrão. CV: coeficiente de variação.

Os valores obtidos para a composição química da madeira, não divergiram dos encontrados na literatura para a espécie estudada, sendo que Flórez et al. (2014) encontrou (57,94; 32,47; 8,95 e 0,64%), respectivamente para holocelulose, lignina, extrativos e cinzas para as madeiras de teca utilizadas em seus estudos. Enquanto, Miranda et al. (2011) estudando madeiras de teca oriundas do Timor Leste, obteve resultados de 56,40; 32,50; 9,40 e 1,70% de holocelulose, lignina, extrativos totais e cinzas, respectivamente para madeiras entre 50 a 70 anos.

Chagas (2013) avaliando a preservação da madeira de teca de quatro idades distintas (4; 6 e 12 anos), em sua caracterização química, obteve valores de 63,96; 31,65 e 4,39%, respectivamente de holocelulose, lignina e extrativos para madeiras de quatro anos, enquanto as madeiras de doze anos, os resultados apresentados pelo autor foram de 64,01; 31,23 e 4,76% (holocelulose, lignina e extrativos).

Observa-se que os extrativos obtidos por este estudo são superiores aos descritos por Flórez et al (2014); Miranda et al. (2011) e Chagas (2013), esta composição química denominada de componentes acidentais da madeira, pode estar relacionado à composição química do solo do povoamento florestal, já que as madeiras deste estudo provêm de um maciço florestal manejado para produtos sólidos de madeiras, em que antes do plantio florestal, foi realizado o manejo adequado do solo.

Uma das principais características da madeira de teca é sua estabilidade dimensional, bem como, sua durabilidade natural, que estão relacionadas com os extrativos presentes na madeira. Entretanto existe diversos estudos que caracterizaram quimicamente as madeiras de teca oriundas de diversas localidades, bem como, uma ampla faixa de idade das árvores, determinando o teor de extrativos presentes na madeira. Windeisen et al. (2003) ao estudarem as madeiras de teca de plantio do Panamá, obtiveram valores de extrativos de 4 a 8% para madeiras de 30 anos, dependendo da região basal das árvores.

Thulasidas; Bhat (2009), no entanto, encontraram teores de extrativos de 13,31% para madeiras de teca oriundas da província de Kerala-Índia, tendo as árvores estudadas 35 anos. Marinonio (2011) estudando o efeito do espaçamento no teor de extrativos das madeiras de teca, apresentou resultados de 4,55% de extrativos em madeiras de 12 anos, outro estudo realizado em que se determinou o teor de extrativos para madeiras de teca foi o de Haupt et al. (2003), avaliando a durabilidade natural em plantios de teca de 29 anos em Mianmar, apresentaram

valores de 8,8% a 9,4% para o teor de extrativos, enquanto estudos realizados por Lobão et al. (2011), obtiveram teores de extrativos totais de 9,74%.

Outro fator que contribui para a elevada durabilidade natural da madeira de teca é a quantidade de tectoquinona, substância de origem aromática presente em algumas espécies da família verbenáceas, que confere propriedades antifúngicas, bactericidas e repelentes ao ataque de insetos (HAUPT et al., 2003; WINDEISEN et al., 2003).

## 4.2 SECAGEM DRÁSTICA A 100 °C

### 4.2.1 Umidade inicial, tempo e taxa de secagem

Os resultados referentes à velocidade de secagem e o tempo decorrido (Tabela 8) para a secagem drástica a 100°C das madeiras de teca (*Tectona grandis*), sendo a velocidade de secagem calculada em função da cinética da secagem (água capilar, água higroscópica e água capilar e higroscópica) até a condição de 5% de umidade das madeiras.

TABELA 8 - UMIDADE INICIAL, TEMPO DE SECAGEM E TAXA DE SECAGEM DA MADEIRA DE *Tectona grandis*, PARA A SECAGEM DRÁSTICA A 100°C

Espécie	Umidade inicial (%)	Tempo (horas)	Taxa de secagem [g.(cm <sup>2</sup> .hora) <sup>-1</sup> ]		
			Verde - 30%	30% - 5%	Verde - 5%
Média	123,44	8,64	0,0487	0,0100	0,0281
DP	12,42	1,44	0,0131	0,0036	0,0052
CV (%)	10,06	16,62	26,83	35,98	18,53

Nota. DP: desvio padrão. CV: coeficiente de variação.

As madeiras de teca iniciaram a secagem drástica a 100 °C com um teor de umidade médio de 123,44%. É notório que a umidade inicial, afeta de forma significativa o processo de secagem, pois, a remoção da água capilar, deve ocorrer de forma lenta e com certo critério, tornando-se um fator limitante para a condução



da secagem. A umidade influencia no tempo de secagem, assim como, na velocidade de secagem da madeira.

O tempo médio decorrido para os ensaios da secagem drástica a 100°C, até um teor de umidade final de 5% foi de 8,64 horas. Arruda (2014) avaliando madeira juvenil de teca de três idades distintas encontrou tempos de secagem para esta metodologia de 6,50; 9,60 e 12,10 horas, respectivamente para madeiras com idades de 6; 8 e 10 anos. É notório que madeira juvenil apresente menores tempos de secagem, em função, dos aspectos anatômicos, caracterizando-se por uma proporção de vasos e fibras contendo paredes celulares mais finas e intrínseco à espécie em questão (*Tectona grandis*), menor proporção de extrativos impregnados nas paredes celulares. Consequentemente, menos obstruções para o fluxo de fluidos.

A perda de umidade (Figura 8), segue uma tendência exponencial, assim como, descrito por Susin (2012), avaliando madeiras do gênero *Eucalyptus*. Andrade (2000) e Arruda (2014) também apresentaram modelos exponenciais em seus estudos. No entanto, o modelo de regressão que melhor se ajusta à espécie estudada, foi de  $[b - b_0 \cdot \sqrt{x}]$ , em que, se obteve um valor de coeficiente de determinação ajustado elevado (95,64%), significativo ao nível de 1% e com um erro padrão da estimativa de 8,73%.

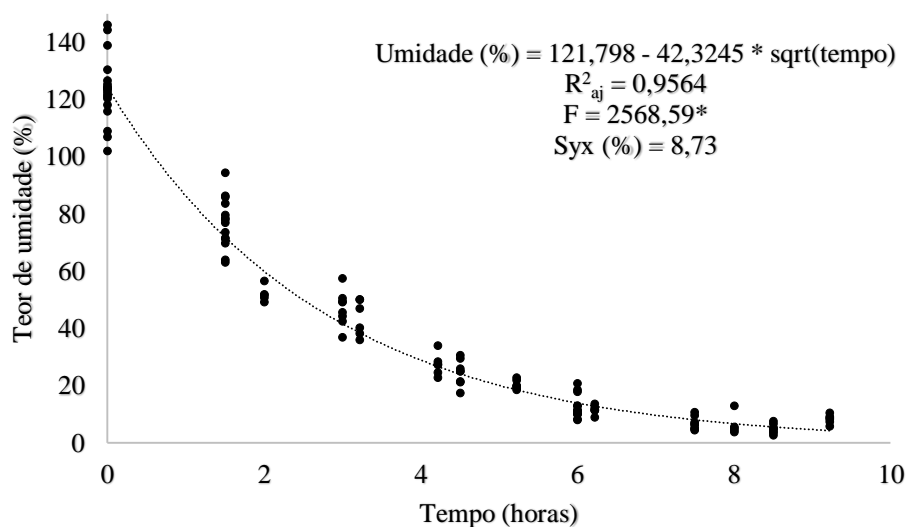


FIGURA 8 - Regressão relacionando a perda de umidade com o tempo de secagem para a madeira de teca (*Tectona grandis*) para a secagem drástica a 100°C

Nota: sqrt: raiz quadrada;  $R^2_{aj}$ : coeficiente de determinação ajustado; Syx: erro padrão da estimativa; F: fator de significância; \* nível de significância 1%.

Ao avaliar o comportamento da taxa de secagem da madeira para cada fenômeno físico da secagem (capilaridade e difusão) das madeiras (Figura 9), nota-se o clássico comportamento dos fenômenos físicos em função do tipo de água removida da madeira. Nas primeiras horas da secagem (fase 1) seguiu-se uma tendência linear ( $Y = a + b \cdot X$ ), onde o principal fenômeno físico envolvido nesta etapa é a capilaridade. A segunda fase da cinética de secagem, em que a remoção da umidade da madeira ocorre pelos fenômenos físicos de capilaridade e difusão, sendo nos estágios iniciais a capilaridade de forma predominante. A medida que o teor de umidade vai reduzindo, o fluxo de fluido por este fenômeno (capilaridade) ocorre de forma menos expressiva, sendo predominante o fluxo de fluidos por difusão, onde pode-se observar a tendência parabólica. Na terceira fase da secagem (difusão), sendo a remoção da água higroscópica da madeira, segue a tendência exponencial ( $Y = \exp(a + b \cdot X)$ ).

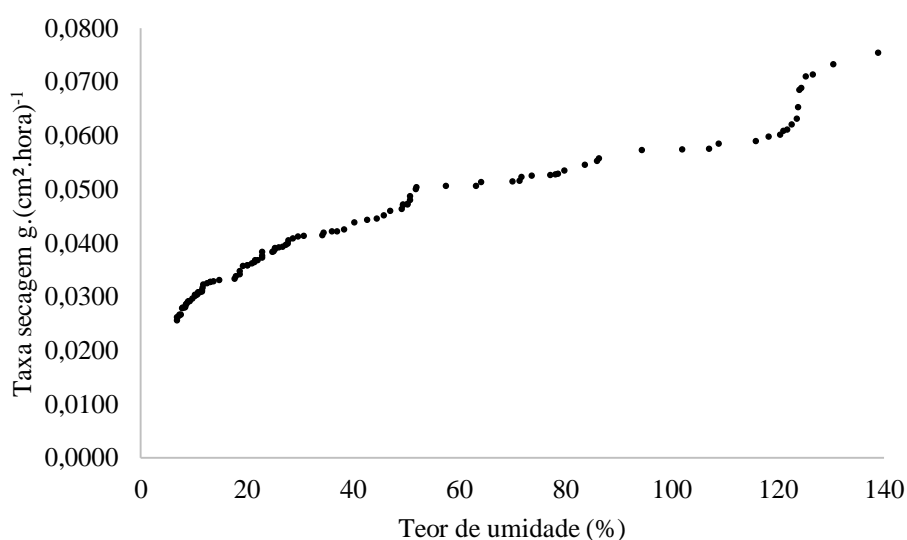


FIGURA 9 - Taxa de secagem da madeira de teca (*Tectona grandis*) em cada fase da cinética de secagem para a secagem drástica a 100°C.

Foram desenvolvidos modelos matemáticos para estimar a taxa de secagem (Tabela 9) que melhor se adequa à cinética da secagem (Figura 9) para cada fenômeno físico envolvido no processo de remoção de umidade das madeiras.

TABELA 9 - MODELOS AJUSTADOS PARA A TAXA DE SECAGEM DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*) PARA CADA FASE DA CINÉTICA DE SECAGEM PARA A SECAGEM DRÁSTICA A 100°C

Cinética da secagem	Modelos ajustados	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Syx (%)	F
Capilaridade	Ts = 0,00284764 + 0,000548338*Umidade	73,49	0,002833	31,49**
Capilaridade e difusão	Ts = $\sqrt{(-0,000317916 + 0,000353573*\sqrt{(Umidade)})}$	98,11	0,000079	2126,71**
Difusão	Ts = exp(-4,95482 + 0,0349134*Umidade)	93,52	0,068151	809,12**

Nota: Ts: Taxa de secagem; exp: exponencial; R<sup>2</sup><sub>aj</sub>: Coeficiente de determinação ajustado; Syx: Erro padrão da estimativa. F: fator de significância; \*\*significativo a 5%.

Observa-se (Tabela 9), que os modelos ajustados para estimar a taxa de secagem da madeira de teca, explicam de forma satisfatória o comportamento para cada fenômeno físico envolvido (capilaridade, capilaridade e difusão e difusão), tendo os coeficientes de determinação ajustados satisfatórios (73,49; 98,11 e 93,52%, respectivamente), atrelados à um erro padrão da estimativa baixo (0,002833; 0,000079 e 0,068151%, respectivamente). Com relação ao fator de significância, todos foram significativos ao nível de 5%, no entanto, as diferenças apresentadas entre eles, estão em função do grau de liberdade que cada um apresenta, por tanto, não pode inferir comparações entre os mesmos. Pelo fato do fenômeno de capilaridade, ocorrer nos estágios iniciais da secagem infere-se em uma quantidade de observações inferior às demais fases envolvidas.

Outro fator de relevância a ser observado nos modelos ajustados para estimar a taxa de secagem, nota-se que o melhor modelo que se representa para a fase parabólica é a função  $Y = \sqrt{a + b*\sqrt{X}}$ , sendo a função dependente da raiz quadrada das observações obtidas, o qual não deixa de ser uma função parabólica.

Jankowsky (2009), ao utilizar esta mesma metodologia em seus estudos, encontrou para as espécies de *Pinus* sp., *Erismia uncinatum* Warm (quarubarana), *Apuleia leiocarpa* J. Vogel (grápia) e *Eucalyptus* sp., tempos de secagem de 6,18; 11,81; 11,35 e 10,18 horas, respectivamente. Sendo estas espécies, apresentando um teor de umidade inicial semelhantes às madeiras de teca.

Para a velocidade de secagem da madeira nota-se (Tabela 8) que a taxa de secagem da água capilar (condição verde até 30% de umidade), foi 78% superior do que a taxa de secagem correspondente à remoção da água higroscópica (30% a 5%

de umidade), as quais compreendem valores de 0,0461 e 0,0098 g.(cm<sup>2</sup>.hora)<sup>-1</sup>, respectivamente. Avaliando, a taxa de secagem, desde a condição verde da madeira até 5% de umidade, observa-se valores de 0,0281 g.(cm<sup>2</sup>.hora)<sup>-1</sup>, sendo esta taxa impulsionada pelos valores relativos à remoção da água capilar da madeira.

Arruda (2014), em seus estudos obteve valores para a velocidade de secagem da condição verde até 30% de umidade de 0,041; 0,031 e 0,033 g.(cm<sup>2</sup>.hora)<sup>-1</sup>, respectivamente, para madeiras de 6; 8 e 10 anos. Resultados estes não discrepantes aos encontrados neste estudo. Para a taxa de secagem da fase parabólica, o mesmo autor obteve valores inferiores (0,016; 0,010 e 0,010) respectivamente, para as mesmas idades citadas anteriormente.

Jankowsky (2009), relatou valores para a velocidade de secagem para as espécies de *Pinus* sp., *Erisma uncinatum* Warm (quarubarana), *Apuleia leiocarpa*. Vogel (grápia) e *Eucalyptus* sp. da condição verde até 30% de umidade de 0,0749; 0,0370; 0,0525 e 0,0363 g.(cm<sup>2</sup>.hora)<sup>-1</sup>, respectivamente. Já para a taxa de secagem da água higroscopia, os valores descrito pelo autor (0,0203; 0,0112; 0,0107 e 0,0125 g.(cm<sup>2</sup>.hora)<sup>-1</sup>), respectivamente para as mesma espécies. Tais espécies foram relatadas, pelo fato das mesmas apresentarem umidade inicial semelhante às madeiras deste estudo (teca). As espécies estudas pelo autor que tiveram comportamento semelhante às madeiras de teca (0,0281 g.(cm<sup>2</sup>.hora)<sup>-1</sup>) de taxa de secagem da condição verde até 5% de umidade sendo, o gênero *Pinus* de 0,0203 g.(cm<sup>2</sup>.hora)<sup>-1</sup>, a *Virola surinamensis*, conhecida como virola de 0,0207 g.(cm<sup>2</sup>.hora)<sup>-1</sup> e a *Trattinnickia burserifolia* Mart, conhecida como amesclão de 0,029 g.(cm<sup>2</sup>.hora)<sup>-1</sup> de taxa de secagem.

Nesta metodologia empregada de secagem drástica a 100°C, desenvolvida por Terezawa (1965) e aprimoramentos realizados por Brandao (1989); Ciniglio (1998); Jankowsky (2009), não utilizaram a massa específica da madeira, para a determinação dos parâmetros envolvidos. É difundido na literatura (KOLLMANN; COTE JUNIOR, 1968; SIAU, 1984; SIMPSON, 1991; KLITZKE, 2007; OLIVEIRA et al., 2010) que a massa específica da madeira, é de suma importância na predição do comportamento da madeira durante a etapa de secagem, podendo fazer inferências de que maior massa específica, menores serão a taxa de secagem da madeira.

De certa forma, não podemos contestar tal relação, no entanto, existe outros fatores, intrínsecos à madeira, que afetam de forma significativa a taxa de secagem.

Como exposto por Susin (2012), em que, avaliando os valores encontrados para madeiras de *Eucalyptus saligna* e para o *Eucalyptus robusta*, não tiveram diferenças estatísticas para a taxa de secagem destas madeiras, no entanto, as espécies diferem estatisticamente para suas massas específicas básicas. O que confirma a influência da permeabilidade da madeira, visto que, madeiras com maior massa específica, possuem maior espessura da parede celular e, conseqüentemente, menor volume do lume, tornando-se menos permeável. Isso também implica em maior quantidade de água higroscópica, cuja movimentação é mais lenta.

Diante dos resultados obtidos pela velocidade de secagem, pode-se prever que a madeira de teca, tende a apresentar um comportamento durante o processo de secagem em câmara convencional facilidade, principalmente nos primeiros estágios do processo (acima PSF).

#### 4.2.2 Parâmetros para a elaboração do programa de secagem

Observa-se (Tabela 10) que as informações referentes a elaboração do programa de secagem para a metodologia de secagem drástica a 100°C, de temperatura inicial, temperatura final, assim como, o potencial de secagem indicado, para a madeira de teca (*Tectona grandis*). O aquecimento realizado à temperatura próxima de 44 °C e finalizando o processo com temperatura interna da câmara convencional em torno de 67 °C, e com um potencial de secagem de 2,4, enfatiza a facilidade da remoção de água da madeira, durante o processo de secagem.

TABELA 10 - TEMPERATURA INICIAL, TEMPERATURA FINAL E POTENCIAL DE SECAGEM PARA MADEIRA DE *Tectona grandis* PARA A SECAGEM DRÁSTICA A 100°C.

Espécie	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Potencial de secagem
Média	43,86	66,83	2,4
DP	2,58	1,12	0,17
CV (%)	5,89	1,68	7,24

Nota: DP: desvio padrão. CV: coeficiente de variação.

O potencial de secagem é obtido pela razão entre o teor de umidade da madeira e umidade de equilíbrio do ambiente de secagem, o qual corresponde a forma de progresso da secagem da madeira (KLITZKE, 2007). O potencial de

secagem obtido para as madeiras de teca foi de 2,4, estando este também, relacionado com o fator anisotrópico da madeira. Klitzke (2007) cita que madeiras que possuem elevados coeficientes de anisotropia (acima de 2,5) é recomendado utilizar baixos potenciais de secagem (próximo a 2,0).

Os parâmetros de temperatura (inicial e final) encontrados neste estudo corroboram aos descritos por Arruda (2014), para as três idades avaliadas. Já o potencial de secagem, há uma divergência entre os resultados obtidos por esta pesquisa (2,37) com os descritos pelo autor, os quais foram de 2,20; 1,86 e 1,89 respectivamente para as idades de 6; 8 e 10 anos.

Mendes et al. (1998) descrevem uma série de programas para madeiras brasileiras em função das informações gerais da espécie e espessura da peça em questão. No entanto, para os cinco programas de secagem proposto para madeiras de *Tectona grandis*, todos os parâmetros de temperatura inicial e temperatura final, assumem valores superiores aos obtidos pelo teste de secagem drástica a 100°C. Analisando os potenciais de secagem descritos pelo autor, verifica-se que são semelhantes aos obtidos nesta pesquisa.

Na Tabela 11, verifica-se os parâmetros dos programas descritos na literatura para a madeira de teca (*Tectona grandis*).

TABELA 11 - PARÂMETROS DOS PROGRAMAS DE SECAGEM DISPONÍVEIS NA LITERATURA PARA A MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*)

Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Potencial de secagem	Idade (anos)	Espessura (mm)	Autor
43,86	66,83	2,4	10	25	O autor (2015)
42	68	2,20	6	Não informado	Arruda (2014)
39	62	1,86	8	Não informado	Arruda (2014)
42	66	1,89	10	Não informado	Arruda (2014)
60	82	2,31	Não informado	25 a 38	Mendes et al. (1989)
60	80	2,56	Não informado	30	Mendes et al. (1989)
57	76,5	2,60	Não informado	38	Mendes et al. (1989)
54	82	2,31	Não informado	50	Mendes et al. (1989)
60	82	4,25	Não informado	Não informado	Boone et al. (1988)

Os parâmetros de temperatura inicial e final proposto por Boone et al. (1988), aliado a Mendes et al. (1989) para a espessura de 25 a 38 mm foram os parâmetros descritos em que se utilizaram as mais temperaturas, Boone et al. (1988), no entanto, utilizou os maiores potenciais de secagem (4,25) descrito na literatura para a espécie de *Tectona grandis*.

#### 4.2.3 Incidência de defeitos na secagem drástica a 100°C

Com relação ao defeito de rachaduras de topo relacionados os parâmetros da secagem drástica a 100°C (R1; R2 e R3), não foi verificado a incidência destes defeitos em nenhum estágio da experimentação, assim como, para as rachaduras superficiais (S1, S2 e S3). Resultados semelhantes foram expostos por Arruda (2014), admitindo a madeira juvenil de teca com diferentes idades, tendem a possuir baixa incidência de rachaduras de topo. Espera-se que a espécie pelo comportamento apresentado, suporte secagem mais severa, assim recomenda-se estudos neste sentido para confirmar este comportamento.

As avaliações referentes à incidência de colapso proporcionado pela secagem drástica a 100°C, as avaliações realizadas nas madeiras, também não evidenciaram este tipo de defeito.

#### 4.2.4 Retração volumétrica da madeira na secagem drástica a 100°C

A secagem acelerada das madeiras de teca resultou em retração volumétrica de 7,84% até sua condição seca (Tabela 12). A retração volumétrica é resultante do somatório das retrações em largura, espessura e comprimento das amostras, cujo os resultados obtidos corroboram com uma das principais propriedades na madeira de teca, a sua elevada estabilidade dimensional em comparação às outras espécies florestais de rápido crescimento e com potencial aplicações em produtos de maior valor agregado.

TABELA 12 - RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*) NA SECAGEM DRÁSTICA A 100°C

Espécie	Retração da volumétrica (%)
Média	7,84
DP	2,14
CV(%)	27,29

Nota: DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação

Dentre estas espécies madeireiras, podemos citar o mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.), em que, Silva (2010); Rezende et al. (2012); Silva (2013), obtiveram valores de retração volumétrica de 16,85; 10,60 e 10,10%, respectivamente. Já Braz et al. (2013) estudando madeiras de cedro australiano (*Toona ciliata*) de três idades diferentes, obteve valores de retração volumétrica de 15,67; 14,73 e 13,09%, respectivamente para as idades de 6; 12 e 18 anos. Outra espécie de potencial aplicação para a indústria de base florestal, a *Hovenia Dulcis* (uva do japão), teve nos estudos de Susin et al. (2014) valores de retrações volumétrica parciais (7,5% de umidade) de 8,60%.

Observando estes valores é notório as diferenças da retração volumétrica, quando comparadas com diversos estudos de outras espécies de rápido crescimento produtoras de madeiras e que possuem potencial uso a produtos que demandam elevada qualidade por parte da matéria prima.



Quando comparado com estudos realizados utilizando a mesma espécie, nota-se também a similaridades dos resultados obtidos com estudos feitos por Wanneng et al. (2014) ao avaliarem as madeiras de teca (*Tectona grandis*) de diferentes idades, obtiveram retração volumétrica de 6,02; 6,08; 6,16 e 6,04%, respectivamente para madeiras com idades de 10; 15; 20 e 25 anos.

#### 4.3 SECAGEM COM BASE NA MASSA ESPECÍFICA BÁSICA DA MADEIRA

##### 4.3.1 Massa específica básica, umidade inicial e tempo decorrido

Verifica-se na Tabela 13 os resultados referentes à massa específica básica, umidade inicial e tempo decorrido para a secagem com base na massa específica básica das madeiras de teca (*Tectona grandis*), sendo estas informações fornecidas pela metodologia de Simpson (1996) para a elaboração da curva de secagem.

TABELA 13 - MASSA ESPECÍFICA BÁSICA, UMIDADE INICIAL E TEMPO DE SECAGEM DA MADEIRA DE *Tectona grandis*, PARA A SECAGEM COM BASE NA MASSA ESPECÍFICA BÁSICA

Espécie	Massa específica básica (g·cm <sup>-3</sup> )	Umidade inicial (%)	Tempo (horas)
Média	0,45	115,02	14,00
DP	0,03	18,50	1,15
CV (%)	6,67	16,09	8,25

Nota. DP: desvio padrão. CV: coeficiente de variação.

As madeiras de teca tiveram massa específica básica de 0,45 (g·cm<sup>-3</sup>), sendo classificação sugerida por Carvalho (1996), se enquadra como madeiras leves, podendo predizer que a espécie apresenta uma tendência de facilidade em sua secagem. Em que as madeiras iniciaram a secagem com um teor de umidade médio de 115,02%, sendo o teor de umidade inicial para esta metodologia de suma importância, já que para a condução da experimentação a estufa está a uma temperatura inicial de 52°C, mantendo-se constante até as madeiras atingirem o PSF%. Apesar da facilidade da remoção da água capilar, a temperatura do ambiente

de secante, exerce influência significativa nesta fase de secagem, pois, quanto maior a temperatura, maior será a taxa de evaporação de umidade da madeira (SEVERO, 1989; KLITZKE, 2007).

O tempo médio decorrido para a secagem com base na massa específica básica da madeira, até um teor de umidade final de 5% foi de 14,00 horas, o que pode estar relacionado com as baixas temperaturas iniciais da estufa para a remoção da água capilar. O tempo médio decorrido para que as madeiras atingissem 30% de umidade, foi de 9 horas (Figura 10), sendo a partir desta fase, o aumento de forma gradativa da temperatura do ambiente secante, até que as madeiras atingissem 5% de umidade final.

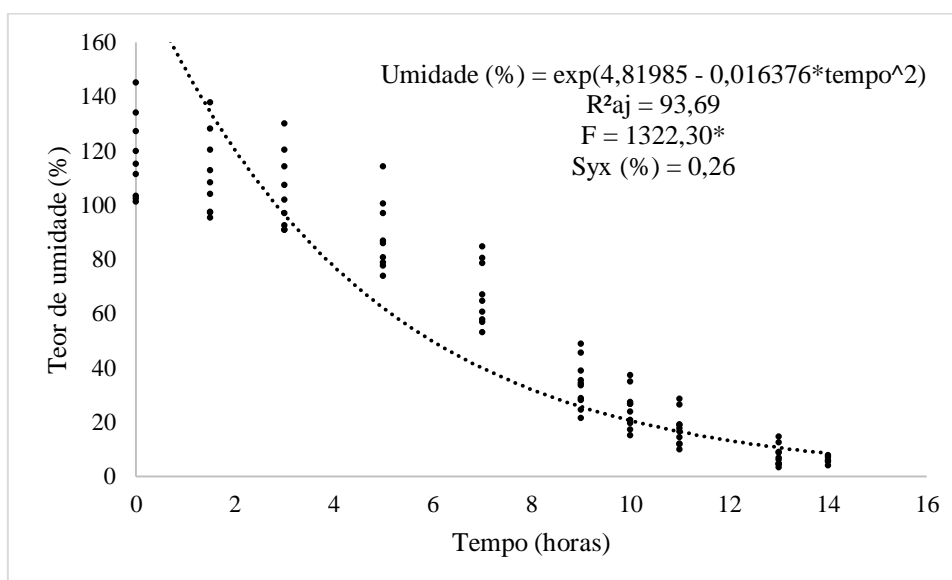


FIGURA 10 - Regressão relacionando a perda de umidade com o tempo de secagem para a madeira de *Tectona grandis* para a secagem com base na massa específica básica

Nota: exp: exponencial;  $R^2_{aj}$ : coeficiente de determinação ajustado; Syx: erro padrão da estimativa; F: fator de significância; \* nível de significância 1%.

A cinética da secagem (Figura 10), segue uma tendência exponencial, assim como, para a metodologia empregada para a secagem drástica a 100 °C (Figura 9), em que o modelo de regressão que melhor se ajusta à espécie estudada para esta metodologia, foi  $[\exp(b - b_0 \cdot x^2)]$ , em que, se obteve um valor de coeficiente de determinação ajustado elevado (93,69%), significativo ao nível de 1% e com um erro padrão da estimativa de 0,26%.

#### 4.3.2 Parâmetros para a elaboração do programa de secagem

Para a determinação dos parâmetros (Tabela 14) para a elaboração do programa de secagem com base na metodologia proposta por Simpson (1996), que leva em consideração apenas a massa específica básica da madeira.

Os resultados referentes à temperatura inicial e a depressão psicrométrica (52,63 e 3,21°C, respectivamente) para a madeira de teca, verificou-se que são similares aos obtidos por Eleotério; Silva (2014), os quais, propuseram curvas de secagem para as madeiras de marupá - *Simarouba amara* Aubl. (57,60; 3,8°C), pará-pará - *Jacaranda copaia* (Aubl.) D. Don (58,20; 3,9°C), e virola - *Virola surinamensis* (57,60; 3,8°C), respectivamente para temperatura inicial e depressão psicrométrica, as quais possuem massa específica básica semelhantes às madeiras de teca do presente estudo.

TABELA 14 - TEMPERATURA INICIAL, DEPRESSÃO PSICROMÉTRICA E POTENCIAL DE SECAGEM PARA A ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE SECAGEM MADEIRA DE *Tectona grandis* COM BASE NA MASSA ESPECÍFICA BÁSICA

Espécie	Temperatura inicial (°C)	Depressão psicrométrica (°C)	Potencial de Secagem
Média	52,63	3,21	3,1
DP	1,35	0,15	-
CV (%)	2,56	4,66	-

Nota. DP: desvio padrão. CV: coeficiente de variação

O potencial de secagem médio (3,1), foi determinado pela razão do teor de umidade atual da madeira pela umidade de equilíbrio. A metodologia empregada relata que até o PSF da madeira, mantém-se a temperatura e abaixo do PSF, eleva-se de forma gradativa a temperatura, juntamente com a depressão psicrométrica calculada (3,21°C).

Assim sendo, a madeira de teca (*Tectona grandis*) até atingir o PSF, o processo de secagem é conduzido com potencial de secagem de 1,9 e abaixo do o potencial de secagem eleva-se de forma gradativa em função do teor de umidade, finalizando o processo com potencial de 3,3.

#### 4.3.3 Incidência de defeitos na secagem com base na massa específica básica da madeira

Com relação ao defeito de rachaduras de topo relacionados aos parâmetros da secagem drástica a 100°C, R1; R2 e R3 (mencionado no item 3.3.3.2 Parâmetros para elaboração do programa – Capítulo 1), não foi verificado a incidência destes defeitos em nenhum estágio da experimentação para a elaboração do programa com base na massa específica básica da madeira, assim como, para as rachaduras superficiais (S1, S2 e S3).

As avaliações referentes à incidência de colapso proporcionado pela secagem com base na massa específica básica, também não evidenciaram este tipo de defeito.

#### 4.3.4 Retração volumétrica da madeira na secagem com base na massa específica básica

A secagem com base na massa específica da madeira de teca resultou em retração volumétrica até o teor de 5% de umidade de 8,93% respectivamente (Tabela 15).

TABELA 15 - RETRAÇÃO TANGENCIAL, RADIAL, AXIAL E VOLUMÉTRICA DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*) NA SECAGEM COM BASE NA MASSA ESPECÍFICA BÁSICA DA MADEIRA

Espécie	Retração da volumétrica (%)
Média	8,93
DP	1,19
CV(%)	13,33

Nota: DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação

Os valores para a retração da madeira de teca (*Tectona grandis*), condizem com os descritos na literatura, sendo que Miranda et al. (2011), obtiveram retração volumétrica de 7,60%, respectivamente para madeiras de teca provenientes do Timor Leste.

Portanto, as madeiras de teca independente da metodologia empregada para a elaboração do programa de secagem, tiveram retração volumétrica, seguindo as características intrínsecas à espécie.

#### 5.4 COMPARAÇÕES ENTRE AS METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM

Observa-se (Tabela 16) diferença estatística para a temperatura inicial entre as metodologias avaliadas para a elaboração do programa de secagem. A metodologia sugerida por Ciniglio (1998), denominada de secagem drástica a 100°C inicia-se a secagem da madeira com temperatura próxima de 44°C, enquanto a metodologia de Simpson (1996), denominada de secagem com base na massa específica básica inicia-se a secagem com a temperatura superior em torno de 53°C.

TABELA 16 - COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA INICIAL E POTENCIAL DE SECAGEM PARA A MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*) PARA ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE SECAGEM ENTRE AS DUAS METODOLOGIAS TESTADAS

Espécie	Secagem drástica a 100°C		Secagem com base na massa específica básica	
	TI (°C)	PS	TI (°C)	PS
Média	43,86 a	2,4	52,63 b	3,1
DP	2,58	0,17	1,35	-
CV(%)	5,89	7,24	2,56	-

Nota: TI: temperatura inicial; TF: temperatura final; PS: potencial de secagem; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação. Médias seguidas pela mesma letra minúscula (horizontal) não diferem estatisticamente entre si (Tukey,  $p \geq 0,05$ ).

Na Figura 11, consta o perfil de temperatura inicial para ambas as metodologias, onde de forma ilustrativa, se observa a diferença apresentada pelas metodologias.

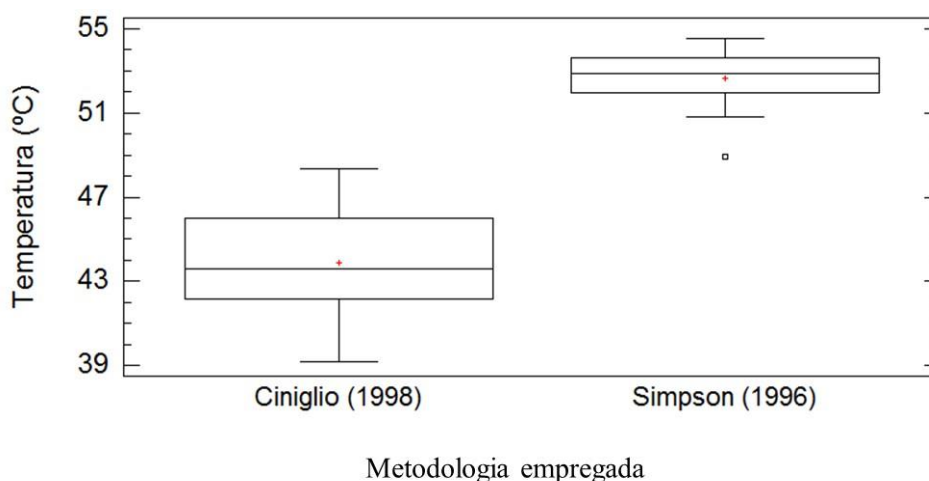


FIGURA 11 - Temperatura inicial para cada metodologia empregada na elaboração do programa de secagem para a madeira de teca (*Tectona grandis*)

O potencial de secagem calculado difere-se para ambas as metodologias (2,4 e 3,1), respectivamente para a secagem drástica a 100 °C e secagem com base na massa específica básica.

A metodologia de Ciniglio (1998) sugere um potencial de secagem constante ao longo de todo o ciclo de secagem, independente do teor de umidade em que a madeira se encontra. A metodologia de Simpson (1996), preconiza um o potencial de secagem mínimo, o qual deve ser constante até o PSF da madeira e para a remoção da água de difusão o potencial é elevado conforme a depressão psicrométrica calculada para cada 5% de perda de umidade.

Em função das características que espécie estudada (*Tectona grandis*) possui, os resultados de temperatura inicial e potencial de secagem obtidos pela metodologia de Ciniglio (1998), foram as que mais condizem com as características intrínsecas à espécie. Klitzke (2007), preconiza que madeiras com elevada massa específica, baixa permeabilidade, devem iniciar o processo de secagem com temperaturas inferiores e potenciais de secagem entre 1,5 a 2,0. A espécie estudada possui massa específica classificada como leve, conforme Carvalho (1996) e IBAMA (2014) e por não apresentar incidência de defeitos, como rachaduras de topo e superfície, pode-se utilizar potenciais de secagem mais elevados, conforme os obtidos pela metodologia aprimorada por Ciniglio (1998).

Eleotério; Silva (2012) ao avaliar metodologias para a elaboração de programas de secagem de madeiras, também relatou temperaturas iniciais inferiores para madeiras de jatobá (*Hymenaea* spp), seguindo a metodologia proposta por

Simpson (1996). Para as madeiras de cumaru (*Dipteryx odorata*) e muiracatiara (*Astronium lecointei*) as temperaturas iniciais seguindo as recomendações de Simpson (1996) foram superiores, entretanto, conforme a elaboração do programa pelos autores, as temperaturas finais para todas as madeiras estudadas, foram superiores.

Ao compararem metodologias para a elaboração de programas de secagem Eleotério; Silva (2014), também concluíram que para madeiras de marupá (*Simarouba amara*) e virola (*Virola surinamensis*) as temperaturas iniciais sugeridas pela metodologia de Simpson (1996) também foram inferiores, no entanto, este estudo, as temperaturas finais não diferem entre as metodologias de Ciniglio (1998) e Simpson (1996).

Os potenciais de secagem apresentados pelos estudos de Eleotério; Silva (2012) e Eleotério; Silva (2014), assim como, os observados no presente estudo, a metodologia de Ciniglio (1998) confere potenciais de secagem mais elevados que a metodologia proposta por Simpson (1996). O que pode ser justificado pelas baixas temperaturas empregadas para o desenvolvimento da experimentação que são elevadas de forma gradativas. Enquanto a metodologia aprimorada por Ciniglio (1998), as temperaturas empregadas para o desenvolvimento da experimentação, torna-se a pressão de vapor da água igual a pressão existente em sua superfície, o que confere o processo físico de ebulição mais rápido.

Para o teor de umidade inicial das madeiras de teca (*Tectona grandis*) não houve diferença estatística entre as metodologias empregadas (123,44 e 115,02%) respectivamente para a secagem drástica a 100 °C e para a secagem com base na massa específica básica (Tabela 17). A homogeneidade da umidade inicial das madeiras para a elaboração do programa de secagem é fundamental, pois, afeta diretamente no tempo de secagem, conseqüentemente, os cálculos da velocidade de secagem são influenciados.

O tempo (horas), decorrido para que as madeiras atingissem 5% de umidade, diferiram-se estatisticamente entre as metodologias (8,64 e 14,00 horas, respectivamente), o que está ligado às temperaturas divergentes para a experimentação (Tabela 17).

TABELA 17 - COMPARAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE INICIAL (%) E TEMPO (HORAS) PARA A SECAGEM PARA A MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*) ENTRE AS DUAS METODOLOGIAS EMPREGADAS

Espécie	Secagem drástica a 100°C	
	Umidade inicial (%)	Tempo (horas)
Média	123,44 a	8,64 a
DP	12,42	1,44
CV (%)	10,06	16,62
Espécie	Secagem com base na massa específica básica	
	Umidade inicial (%)	Tempo (horas)
Média	115,02 a	14,00 b
DP	18,50	1,15
CV (%)	16,09	8,25

Nota: DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação. Médias seguidas pela mesma letra minúscula (vertical) não diferem estatisticamente entre si (Tukey,  $p \geq 0,05$ ).

Nota-se na Figura 12, a plotagem das caixas do box-plot, maiores divergências entre o teor de umidade inicial para a metodologia de Simpson (1996), o que confere maiores coeficientes de variação entre as amostras.

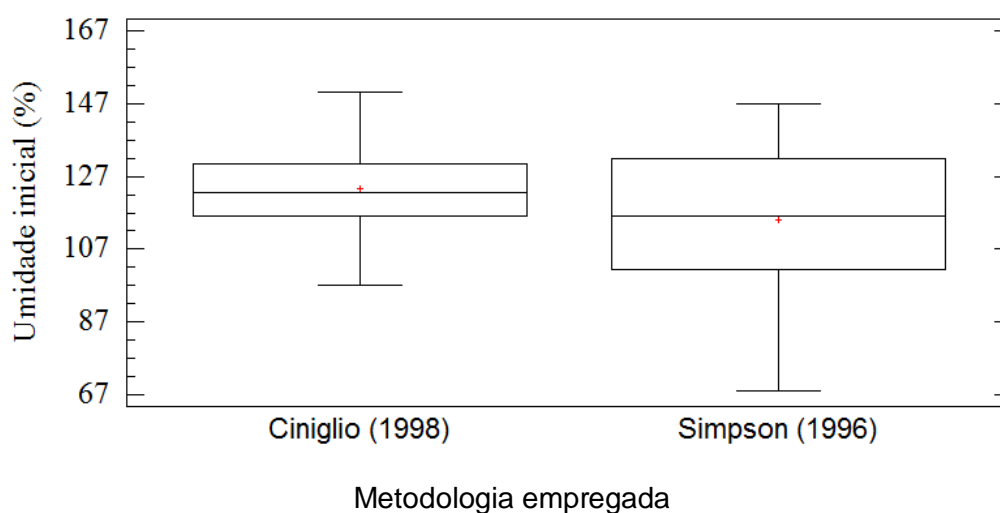


FIGURA 12 - Umidade inicial (%) da madeira de teca (*Tectona grandis*) para cada metodologia empregada na elaboração do programa de secagem

Assim como, pode-se observar (Figura 13), a plotagem das caixas do box-plot, maiores coeficientes de variação para o tempo de secagem das amostras, para a metodologia proposta por Ciniglio (1998). Esta divergência, pode estar relacionada



com o tipo de lenho presente nas madeiras, maior proporção de cerne do que o alburno, assim como, lenho juvenil e lenho adulto.

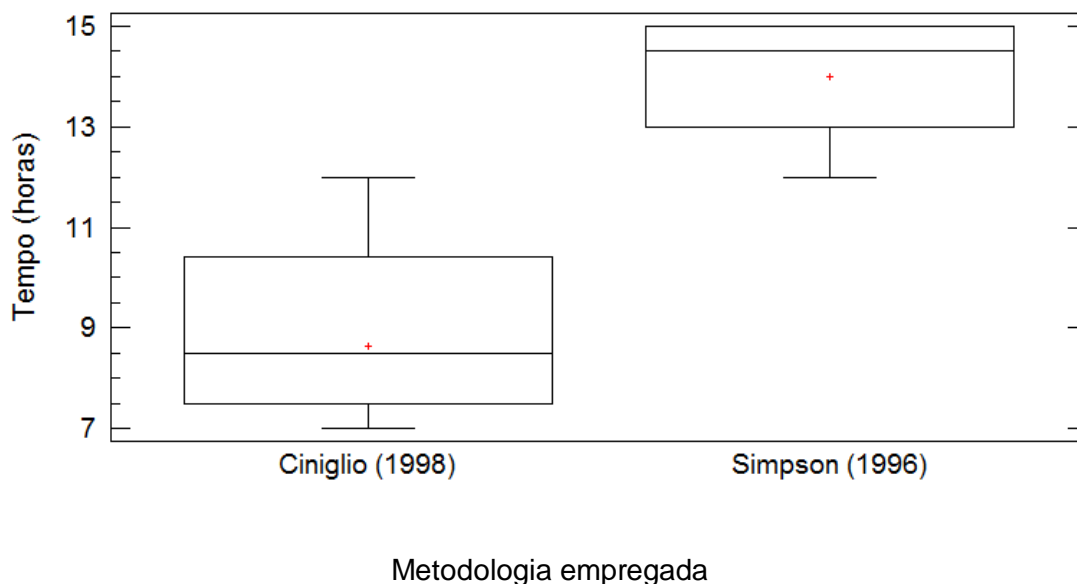


FIGURA 13 - Tempo (horas) da madeira de teca (*Tectona grandis*) para cada metodologia empregada na elaboração do programa de secagem

Para a retração volumétrica das madeiras de teca (*Tectona grandis*), não houve diferença estatística entre as metodologias empregadas, sendo que as madeiras de teca tiveram retração de 7,84 e 8,93%, respectivamente, para a metodologia de Ciniglio (1998) e Simpson (1996), respectivamente (Tabela 18). Nota-se que a temperatura máxima utilizada (100 °C) e a elevação de forma gradual da temperatura não influenciam na aproximação dos feixes celulares da madeira de teca. Oliveira; Tomaselli (1981) no entanto, ao estudarem o efeito da secagem a altas temperaturas em algumas propriedades físicas da madeira de *Araucária angustifolia*, relataram que temperaturas elevadas proporcionaram maiores retrações da madeira.

Os extrativos presentes na parede celular da madeira solúveis em água, ao volatilizarem durante o processo de secagem, proporcionam maiores retrações da madeira. Os elevadores teores de extrativos contribuem para a redução da retração e o inchamento da madeira, pelo fato que a retração é proporcional aos espaços ocupados pelos extrativos na parede celular (TSOUMIS, 1991; TRUGILHO; VITAL, 1996).

TABELA 18 - COMPARAÇÃO DA VOLUMÉTRICA (%) DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*) ENTRE AS DUAS METODOLOGIAS EMPREGADAS

Metodologia empregada	Retração volumétrica (%)
Secagem drástica a 100°C	7,84 a (2,14; 27,29)
Secagem com base na massa específica básica	8,93 a (1,19; 13,33)

Nota: Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão e coeficiente de variação, respectivamente. Médias seguidas pela mesma letra minúscula (vertical) não diferem estatisticamente entre si (Tukey,  $p \geq 0,05$ ).

#### 4.5 PROGRAMA DE SECAGEM ELABORADO

Na Tabela 19 está disposta a elaboração do programa de secagem em câmara convencional, conforme os parâmetros de temperatura inicial, temperatura final e potencial de secagem determinados de acordo com a metodologia proposta por Simpson (1996).

O programa para a secagem da madeira de teca (*Tectona grandis*), conforme os parâmetros preconizados por Simpson (1996), iniciou-se com a temperatura em 53°C, finalizando a secagem com temperatura a 66 °C. O potencial de secagem tendo um comportamento crescente ao longo do ciclo de secagem, em função da faixa de umidade com um valor médio de 3,20.

TABELA 19 - PROGRAMA DE SECAGEM ELABORADO CONFORME SIMPSON (1996)

Umidade da madeira (%)	Temperatura (°C)	Potencial secagem	Tempo (horas)
Aquecimento	53	-	3
>28	53	1,9	-
23	56	2,6	-
18	60	3,0	-
13	63	3,3	-
10	66	3,3	-
Condicionamento	66	1,0	6
Resfriamento	44	-	3

Observa-se que o programa elaborado conforme Simpson (1996), tem potencial de secagem médio de 2,42 até as madeiras atingirem o PSF. A partir deste ponto, o potencial de secagem médio eleva-se para 3,97. Estes valores de potencial de secagem, ocorrem em função da depressão psicrométrica calculada, com base na massa específica básica da madeira.

O programa de secagem elaborado conforme os parâmetros determinados por Ciniglio (1998), consta na Tabela 20.

TABELA 20 - PROGRAMA DE SECAGEM ELABORADO CONFORME CINIGLIO (1998)

Umidade da madeira (%)	Temperatura (°C)		Umidade relativa (%)	Umidade equilíbrio	Tempo (horas)	Potencial secagem
	TBS	TBU				
Aquecimento	44	44	100	-	3	-
45	44	42	88	18	-	2,4
40	46	43	84	16	-	2,5
34	48	44	79	14	-	2,4
28	50	44	70	12	-	2,4
25	53	46	66	10	-	2,4
22	55	46	62	9	-	2,3
18	58	46	51	8	-	2,4
15	60	45	44	6	-	2,3
12	63	44	34	5	-	2,4
10	67	43	28	4	-	2,3
Condicionamento	67	58	67	10	6	1,0
Resfriamento	44	36	51	10	3	-

Nota: TBS: temperatura bulbo seco; TBU: temperatura bulbo úmido.

Para esta metodologia o potencial de secagem determinado matem-se praticamente constante ao longo de todo o ciclo da secagem da madeira de teca, independente do teor de umidade em que a madeira esteja.

Arruda (2014) avaliando madeira de teca provenientes de desbastes, em diferentes idades, elaborou programas de secagem conforme a metodologia preconizada por Ciniglio (1998), em que o potencial de secagem médio foi de 2,26, semelhante ao potencial utilizado para o programa de secagem elaborado neste trabalho de 2,4. Com relação às temperaturas utilizadas, este mesmo autor, iniciou-se a secagem das madeiras a temperatura de 39°C, finalizando com 53 °C,

temperaturas estas, inferiores às utilizadas neste estudo (44 e 67°C, respectivamente).

Já Susin (2012) ao estudar as madeiras do gênero *Eucalyptus*, encontrou para a espécie *E. saligna*, parâmetros de temperatura (inicial e final), semelhantes aos definidos no presente estudo. A secagem das madeiras de *E. saligna* realizada pelo autor iniciou-se a 40°C com término em 67°C, porém em função das características intrínsecas à espécie estudada o autor utilizou potencial de secagem inferior (2,15).

Para o programa de secagem elaborado com base na secagem drástica da madeira a 100°C (Tabela 20), apesar da temperatura ser elevada de forma gradativa ao longo de todas as fases da secagem, observa-se que até o PSF da madeira (próximo a 28%) ocorre um incremento de apenas 6°C na temperatura, no entanto, para a remoção da água higroscópica, o incremento da temperatura é de 17°C.

Existem na literatura alguns estudos propondo programas de secagem para diversas espécies (ANDRADE et al., 2001; BARBOSA et al., 2005; ELEOTÉRIO; SILVA; 2012; SUSIN, 2012; ELEOTÉRIO; SILVA; 2014) em que se utiliza a temperatura constante até o PSF da madeira, para posteriormente realizar o incremento gradual da temperatura. Em madeiras refratárias como as do gênero *Eucalyptus* com elevada densidade é recomendado a adoção de tal medida. Pelo fato que a remoção da água capilar deve ser procedida de forma mais cautelosa, em função dos defeitos ocasionados nesta fase da secagem, como as rachaduras de topo e de superfície, o colapso e o endurecimento superficial da madeira, impedindo assim, o fluxo de fluido ao longo da madeira.

Para as madeiras de teca (*Tectona grandis*) em função da facilidade do fluxo de fluidos aliado a ausência de defeitos nas amostras é possível a utilização do incremento gradual da temperatura para a remoção da água capilar, mantendo-se o gradiente de umidade da madeira próximo como o definido nos ensaios para a determinação do programa de secagem de 2,40.

A velocidade de circulação do ar indicada para o programa de secagem, foi de 2,5 m.s<sup>-1</sup>, sendo a velocidade comumente utilizado para a secagem de madeiras de folhosas, conforme Hildebrand (1970); Ponce; Watai (1985); Klitzke (2002); Klitzke (2007).

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos para as propriedades físicas e químicas da madeira de teca (*Tectona grandis*) no presente estudo permitem as seguintes conclusões:

- A madeira possui elevada estabilidade dimensional, tendo retração volumétrica total de 6,21% e fator anisotrópico de 1,95;
- Com relação aos componentes químicos, a madeira de teca apresentou 11% de extrativos totais, o que pode ter contribuído para a sua estabilidade dimensional;

Os resultados obtidos com relação às metodologias avaliadas para a elaboração do programa de secagem para a madeira de teca (*Tectona grandis*) permitem as seguintes conclusões:

- A temperatura inicial para a secagem da madeira em câmara convencional é maior pela metodologia de Simpson (1996);
- O potencial de secagem para a metodologia de Ciniglio (1998) é inferior que o potencial de secagem médio para a metodologia de Simpson (1996);
- As madeiras de teca (*Tectona grandis*) não apresentaram incidência de defeitos, durante a elaboração do programa de secagem.

## 6. REFERENCIAS

ANDRADE, A; JANKOWSKY, I. P.; DUCATTI, M. A. Grupamento de madeiras para secagem convencional. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 59, p. 89-99, 2001.

ARRUDA, P. M. **Secagem da madeira juvenil de *Tectona grandis* L. F.** 2013. 98f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira), Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14806**. Madeira serrada de eucalipto - Requisitos. Rio de Janeiro. 2002. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**. Determinação do material solúvel em etanol:tolueno e em diclorometano. 2002. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**. Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro. 1997. 107p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989**. Determinação da lignina insolúvel em ácido. 2003.

BARBOSA, C. G.; LIMA, J. T.; ROSADO, S. C. S.; TRUGILHO, P. F. Elaboração de programa de secagem para madeiras de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 40-48, 2005.

BETANCUR, C. A.; HERRERA, J. F.; MEJÍA, L. C. Estudio de las propiedades físicas y mecánicas, trabajabilidad y secado de la teca (*Tectona grandis*) de Puerto Libertador (Córdoba). **Revista Facultad Nacional de Agronomía de Medellín**, Medellín, v. 56, n. 1, p. 913–939. 2000.

BOONE, R. S.; KOZLIK, C. J.; BOIS, P. J.; WENGERT, E. M. **Dry kiln schedules for commercial woods-temperate and tropical**. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, 1988. 158p.

BRANDÃO, A. T. O. **Determinação de metodologia para a indicação de programas de secagem de madeiras**. 1989. 100f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

BRAZ, R. L.; OLIVEIRA, J. T. S.; RODRIGUES, B. P.; ARANTES, M. D. C. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Toona ciliata* em diferentes idades. **Floresta**, Curitiba, v. 43, p. 663-670, 2013.

CARVALHO, A. Denominações convencionais para propriedades da madeira. In: Carvalho, A. **Tecnologia das indústrias da madeira III – Na2**. Vol. I. Lisboa. 1996. 5 p.

CHAGAS, S. F. **Propriedades da madeira de *Tectona grandis* (L.f.), visando a sua utilização para peças preservadas**. 2013. 78f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

CHAGAS, S. F.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; MACEDO, A. M.; CARVALHO, L. Propriedades da madeira de teca de diferentes idades e oriundas de desbaste. **Ciência da Madeira**, v. 5, n. 2, p. 138-150, 2014.

CINIGLIO, G. **Avaliação da secagem de madeira serrada de *E. grandis* e *E. urophylla***. 1998. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

COMISSÃO PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. **COPANT 461**. Determinación del peso específico aparente. 1972. 8p.

COMISSÃO PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. **COPANT 462**. Método de determinación de la contracción.1972. 8p.

ELEOTÉRIO, J. R.; SILVA, C. M. K. Comparação de programas de secagem para Cumaru (*Dipteryxodorata*), Jatobá (*Hymenaea* spp) e Muiracatiara (*Astroniumlecointe*) obtidos por diferentes métodos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, p. 537-545, 2012.

ELEOTÉRIO, J. R.; SILVA, C. M. K. Programas de secagem para marupá (*Simaroubaamara*), pará-pará (*Jacarandacopaia*) e virola (*Virolasurinamensis*). **Floresta**, Curitiba, v. 44, p. 313-322, 2014.

FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA, L. C.; BARBOSA, L. K. F. **Teca (*Tectona grandis* L. f.): principais perguntas do futuro empreendedor florestal**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2005. 87p.

FLORÉZ, J. B.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; HEIN, P. R. G.; SILVA, J. R. M. Caracterización de la madera joven de *Tectona grandis* L.f plantada en Brasil. **Madera y Bosques**, v. 20, p. 11-20, 2014.

FOREST PRODUCTS LABORATORY – LPF. **Wood handbook – Wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, Wisconsin: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. ed. 100, 508 p. 2010.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 111p.



GOVAERE, G.; CARPIO, I.; CRUZ, L. **Descripción anatómica, durabilidad y propiedades físicas y mecánicas de *Tectona grandis***. Laboratorio de Productos Forestales, Universidad de Costa Rica, Costa Rica, 2003. 15p.

GUTIÉRREZ, R. C.; ROMERO, E. J.; CUNUHAY, P. S.; BLANCO, G. L.; FONSECA, C. S. Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de la madera de teca (*Tectona grandis* L.F.) de Quevedo y Balzar. **Ciencia y Tecnología**, Bio-Bio. v. 2, n. 1, p. 55 – 63. 2008.

HAUPT, M.; LEITHOFF, H.; MEIER, D.; PULS, J.; RICHTER, H. G.; FAIX, O. Heartwood extractives and natural durability of plantation-grown teakwood (*Tectona grandis* L.): a case study. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, v. 61, n. 6, p. 473-474, 2003.

HILDEBRAND, R. **Kiln drying of sawn timber**. Germany: Maschinenbau GmbH, 1970. 199p.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. **Banco de dados de madeiras brasileiras**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br>>. Acesso em: 13 nov. 2014.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ (2014). **Anuário estatístico da IBÁ 2014**: ano base 2013. Brasília: IBÁ, 2014. 100 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Informações sobre madeiras (Teca)**. Consultas online. São Paulo, SP. 2010. Disponível em: <[http://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras/78.htm](http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/78.htm)>. Acesso em: 14 nov. 2014.

JANKOWSKY, I. P. **Metodologia simplificada para a indicação de programas de secagem**. 2009. 112f. Tese (Livre docência em Ciência e Tecnologia da Madeira), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009.

KLITZKE, R. J. **Uso do inversor de frequência na secagem de madeiras**. 2002. 239f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

KLITZKE, R. J. Secagem da madeira. In: José Tarcísio da Silva Oliveira, Nilton César Fiedler, Marcelo Nogueira. (Org.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro**. Visconde do Rio Branco: Suprema Gráfica e Editora Ltda, 2007, v. 1, p. 271-366.

KLITZKE, R. J.; BATISTA, D. C. Ensaio de taxa de secagem e escore de defeitos para a predição da qualidade de secagem convencional da madeira de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, v. 38, n. 85, p. 97-105, 2010.

KOKUTSE, A. D.; BAILLÈRES, H.; STOKES, A.; KOKOUET, K. Proportion and quality of heartwood in Togolese teak (*Tectona grandis* L.f). **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 189, n. 1/3, p. 37-48, 2004.

KOLLMANN, F. E. P.; CÔTE JUNIOR, W. A. **Principles of wood science and technology**. New York: Springer-Verlag, 1968. 592p.

LIMA, I. L.; FLORSHEIM, S. M. B.; LONGUI, E. L. Influência do espaçamento em algumas propriedades físicas da madeira de *Tectona grandis* Linn. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 2, p. 244-250, 2009.

LOBÃO, M. S.; CASTRO, V. R; RANGEL, A. SARTO, C.; TOMAZELLO-FILHO, M.; SILA-JUNIOR, F. G. S.; CAMARGO-NETO, L.; BERMUDEZ, M. A. R. C. Agrupamento de espécies florestais por análises univariadas e multivariadas das características anatômica, física e química das suas madeiras. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v. 39, n. 92, p. 469-477. 2011.

MARINONIO, G. B. **Efeito da densidade e do teor de extrativos na variação da cor da madeira de *Tectona grandis* L. f.** 2011. 20f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2011.

MARTINS, V. A. **Secagem de madeira serrada.** Brasília: IBDF, 1988. 56p.

MENDES, A. S.; MARTINS, V. A.; MARQUES, M. H. B. **Programas de secagem para madeiras brasileiras.** Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 1998. 114p.

MILOTA, M. R.; TSCHERNITZ, J. L. Correlation of loblolly pine drying rates at high temperature. **Wood and Fiber Science**, Hanover, v. 22, n. 3, p. 298–313, 1990.

MIRANDA, I.; SOUSA, V.; PEREIRA, H. Wood properties of teak (*Tectona grandis*) from a mature unmanaged stand in East Timor. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 57, n. 3, p. 171-178, 2011.

MORENO, J. R.; ROQUE, R. M. Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Tectona grandis* Linn. F. (teca), proveniente de una plantación de ocho años de edad em Cochabamba, Bolivia. **Kurú Revista Forestal**, San José, v. 3, n. 9, p. 1-14, 2006.

MOTTA, P. **Propriedades tecnológicas da madeira de *Tectona grandis* L.F. proveniente do vale do rio doce, Minas Gerais.** 2011. 126f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2011.

MOYA, R.; BERROCAL, A.; SERRANO, J. R.; TOMAZELLO FILHO, M. Variación radial de la anatomía, densidad y durabilidad de la madera de teca (*Tectona grandis*) procedente de dos calidades de sitio y dos regiones climáticas de Costa Rica.

**Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales**, Madrid, v. 18, n. 2, p.119-131, 2009.

OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M; FIEDLER, N. C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Árvore**, Viçosa, v.34, n.5, p.929-936. 2010.

OLIVEIRA, V. S.; TOMASELLI, I. Efeito da secagem a altas temperaturas em algumas propriedades físicas e mecânicas de madeira jovem de *Araucaria angustifolia*. **Floresta**, v. 1, n.12, p. 17-25, 1981.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Text book of wood technology**. 4 ed. New York: MacGraw-Hill, 1980. 722 p.

PINTO, M. L. **Propriedades e características da madeira de teca (*Tectona grandis*) em função da idade**. 2007. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

PONCE, R. H.; WATAI, L. T. **Secagem da madeira**. Instituto de Pesquisa Tecnológica. Brasília: STI/IPT, 1985. 72p. (Série documentos, 22).

PRATT, G. H. **Timber drying manual**. London: Department of the Environment/Building Research Establishment, 1974. 152p.

RASMUSSEN, E. F. **Dry kiln operator's manual**. Madison: USDA, Forest Service, 1961. 197p.

REZENDE, R. N.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M.; MONTEIRO, T. C.; PAULA, L. E. R. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas das madeiras de *Khaya ivorensis* e *Khaya senegalensis* (mogno africano). In... XIII Encontro Brasileiro em Madeira e em

Estruturas de Madeira – EBRAMEM XIII, 2012; Vitória, ES: IBRAMEM; 2012. Cd rom.

ROQUE, R. M.; LEDEZMA, V. A. Efecto del espaciamiento en plantación sobre dos propiedades físicas de madera de teca a lo largo del fuste. **Madera y Bosque**, México, v. 9, n. 2, p. 15-27, 2003.

SEVERO, E. T. D. **Efeito da temperatura e da velocidade do ar na secagem de madeira serrada de *Pinus Elliottii***. 1989. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

SILVA, B. T. B. **Avaliação da usinagem e caracterização das propriedades físicas da madeira de mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.)**. 2010. 20f. Monografia (Engenharia Florestal), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2010.

SILVA, L. V. M. S. 2010. **Propriedades físicas e mecânicas da madeira de mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.)**. 2013. 17f. Monografia (Engenharia Florestal), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2013.

SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual**. Madison: U.S. Department of Agriculture, 1991. 274 p.

SIMPSON, W. T. **Method to estimate dry-kiln schedules and species groupings: Tropical and temperate hardwoods**. Madison, WI: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1996, 57 p.

SIMPSON, W. T. **Effect of air velocity on the drying rate of single eastern white pine boards**. USDA Forest Service, Research Note FPL-RN-266, 1997, 5p.

STEINHAGEN, H. Effect of kiln air velocity, at various moisture content levels on drying rate of 4/4 yellow-poplar sapwood. **Forest Products Journal**, Madison, v. 24, p. 45 – 47, 1974.

SUSIN, F. **Avaliação de programas de secagem para madeiras de eucalipto elaborados com base em testes prévios a alta temperatura**. 2012. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

SUSIN, F.; SANTINI, E. J.; STANGERLIN, D. M.; MORAIS, W. W. C.; MELO, R. R. Taxa de secagem e qualidade da madeira serrada de *Hovenia dulcis* Submetida a dois métodos de secagem. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 2, p. 243 – 250, 2014.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI 207**. Water solubility of wood and pulp. Atlanta, 1999.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI 211**. Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C. Atlanta, 2002.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI 264**. Preparation of wood for chemical analysis. Atlanta, 1997. 3p.

TERAZAWA, S. Methods for easy determination of kiln drying schedule of wood. **Wood Industry**, v.20, n.5, 1965.

THULASIDAS, P.; BHAT, K. M. Log characteristics and sawn timber recovery of home garden teak from wet and dry localities of Kerala, India. **Small-Scale Forestry**, Chicago, v. 8, n. 1, p. 15-24, 2009.

TRUGILHO, P. F.; VITAL, B. R. Correlação entre algumas características físicas, químicas e anatômicas e a variação dimensional da madeira de eucalipto. **Árvore**, v. 20, n. 4, p. 515-533, 1996.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood**. Structure, properties, utilization. New York: Chapman & Hall, 1991. 494p.

VALERO, S. W.; REYES, E. C. C.; GARAY, D. A. J. Estudio delas propiedades físico mecánicas de la especie *Tectona grandis*, de 20 anos de edad, proveniente de las plantaciones de la unidad experimental de la Reserva Forestal Ticoporo, Estado Barinas. **Revista Forestal Venezolana** v. 49, n. 1, p.61-73, 2005.

VITAL, B. R. **Planejamento e operação de serrarias**. Viçosa: UFV, 2008. 211 p.

WANNENG, P. X.; OZARSKA, B.; DAIAN, M. S. Physical properties of *Tectona grandis* grown in Laos. **Journal of Tropical Forest Science**, Malaysia, v. 26, n. 3, p. 389 –396, 2014.

WINDEISEN, E.; KLASSEN, A.; WEGENER, G. On the chemical characterisation of plantation teakwood from Panama. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, n. 61, p. 416 418, 2003.

## CAPÍTULO 2 – SECAGEM CONVENCIONAL DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis* L. f)

### RESUMO

A secagem adequada de madeiras caracteriza-se pelo processo de remoção de sua umidade, até valores pré-estabelecidos, com a ocorrência mínima de defeitos, com o menor tempo possível e de uma forma economicamente viável para o uso a que se destina o seu produto final. Este estudo teve por objetivo avaliar o programa de secagem elaborado para a secagem em câmara convencional da madeira de teca (*Tectona grandis*). Foi utilizada velocidade de circulação do ar de  $2,5 \text{ m.s}^{-1}$  e potencial de secagem de 2,4. A secagem foi conduzida em uma câmara de secagem convencional piloto, sendo utilizado 50 tábuas com dimensões de 110 x 25 x 660 mm (largura x espessura x comprimento) para cada carga de secagem, sendo realizada três cargas. Foram avaliados os parâmetros de taxa de secagem, tempo de secagem, retração da madeira e a qualidade da madeira seca. O programa de secagem elaborado mostrou-se satisfatório para a secagem da madeira de teca para produtos que requerem matéria prima de qualidade. O teor de umidade final da madeira foi próximo ao programado, conforme a elaboração do programa de secagem e as madeiras não tiveram incidência em defeitos de secagem, os quais, comprometessem a sua utilização para a manufatura em produtos sólidos de madeira.

Palavras-chave: Taxa de secagem. Câmara de secagem convencional. Tensões de secagem. Gradiente de umidade. Defeitos de secagem.



## ABSTRACT

The Proper drying of wood is characterized by the process of its moisture removal, to set values, with minimum occurrence of defects, with the shortest time possible and in a economically viable way to use that is intended for the final product. This study aimed to evaluate the drying program elaborate for teak (*Tectona grandis*) wood, as well as to evaluate the influence of the air velocity below the fiber saturation point (PSF). Were used air velocity of 1.5; 2.5 and 3.5 m.s<sup>-1</sup> and the drying potential of 2.4. Drying was carried out in a kiln drying, using 50 boards with dimensions of 110 x 25 x 660 mm (width x thickness x length) each drying program evaluated. Were evaluated the rate of drying parameters, drying time, wood shrinkage and quality of dried wood. The drying rate of the wood to remove the hygroscopic water had small change as a function of air velocity utilized below PSF, being proportional to the air velocity used. The final moisture content of the wood was close to the scheduled, as the preparation of drying program and the woods did not have defects on drying, which, compromise its use for the manufacture of solid wood products.

Keywords: Drying rate. Air velocity. Conventional kiln drying. Defects drying.

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a utilização de espécies de rápido crescimento, com potencial comercial para a produção de produtos sólidos de madeira, tem-se tornado uma forma de investimento em diversos empreendimentos florestais nacionais. Em função das características edáfo climáticas do Brasil, a espécie *Tectona grandis* tornou-se um atrativo investimento florestal, uma matéria prima alternativa para a indústria madeireira. Existe, entretanto, a necessidade de adequação e aprimoramentos no beneficiamento da madeira, pois a utilização do gênero possui uma carência de informações relevantes quanto à condução da etapa de secagem do material.

A escolha do método de secagem influencia no tempo de secagem, na qualidade do material seco e também na obtenção do teor de umidade desejado para o processo de manufatura da madeira, sendo possível reduzir o tempo de secagem e a incidência de defeitos, quando a secagem é conduzida de forma adequada.

A secagem em câmara convencional é um processo que necessita elevado investimento inicial e um alto consumo de energia, resultando em elevados custos de produção. Isto explica o grande interesse em se buscar formas eficientes de secar a madeira com a rápida redução do teor de umidade sem proporcionar defeito que inviabilizam o uso final da madeira. Klitzke (2007) ainda complementou que a ineficácia do processo se deve à rápida perda da umidade superficial e a lenta translocação da umidade interna para a superfície. A velocidade de secagem, portanto, está diretamente relacionada à espécie, arranjo das pilhas no interior da câmara, assim como, a temperatura empregada e a velocidade de circulação do ar (KLITZKE, 2007).

Pratt (1974), relatou que as câmaras convencionais de secagem operam com temperaturas entre 35 e 90°C. Estes equipamentos dispõem de um sistema de aquecimento; um sistema de umidificação do ar; um conjunto de “dampers” que permitem a troca de ar entre o interior e o meio externo; e um sistema de ventilação que promove a circulação do ar através das pilhas de madeira.

Os principais fatores que afetam a eficiência da secagem de madeiras são os equipamentos utilizados, o sistema de controle, as intervenções realizadas durante o processo e o programa de secagem utilizado.

Em se tratando de equipamentos, a velocidade de circulação do ar e sua distribuição ao longo das pilhas são fatores também importantes para o sucesso da operação. A velocidade de circulação do ar, comumente utilizadas na secagem de madeiras é de  $2,5 \text{ m.s}^{-1}$  (HILDEBRAND, 1970; SIMPSON, 1997; KLITZKE, 2007). Tomaselli (1981); Klitzke (2002), relataram que o processo de secagem de madeiras, depende de energia térmica e energia elétrica, sendo a energia elétrica empregada na maior parte para o funcionamento dos ventiladores das câmaras de secagem, cujo funcionamento ocorre sem interrupções durante todo o ciclo de secagem.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o programa de secagem elaborado para a secagem em câmara convencional da madeira de teca (*Tectona grandis*);

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar a taxa de secagem da madeira de teca (*Tectona grandis*), para o programa de secagem empregado;

Avaliar a umidade final, gradiente de umidade e tensões de secagem da madeira de teca (*Tectona grandis*) para o programa de secagem aplicado;

Avaliar a qualidade das madeiras secas pelo programa de secagem aplicado, sob seus aspectos qualitativos como ocorrência de rachaduras, empenamentos, colapso e gradientes de umidade.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 SECAGEM EM CÂMARA CONVENCIONAL

##### 3.1.1 Equipamento utilizado

Para a secagem das madeiras foi utilizada uma câmara convencional de secagem (piloto), da marca Kiefer com dimensão nominal útil de 0,80 x 0,80 x 4,00 m (largura x altura x comprimento), totalizando uma capacidade de aproximadamente 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada.

O aquecimento ocorre por sistema elétrico, sendo realizado por três resistências blindadas (trocadores de calor) e dotada de circulação forçada de ar, no qual, ocorre por um ventilador do tipo axial com produção de 3600 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>.

A umidade relativa da câmara é controlada pelo sistema de vaporização, sendo gerado por uma caldeira elétrica com capacidade de produção de vapor de 40 kg.h<sup>-1</sup> e por um conjunto de *dumpers*, localizados nas extremidades da câmara de secagem, sendo um de entrada e outro de saída de ar. A Figura 14 ilustra o equipamento utilizado.



FIGURA 14 - Componentes da estufa de secagem convencional

Nota: (A) Caldeira elétrica; (B) controlador lógico programável; (C) *dumper* frontal para entrada de ar; (D) *dumper* para saída de ar.

Para o monitoramento da secagem, a câmara de secagem é dotada de um sistema de gerenciamento automatizado no qual permite monitorar, controlar e modificar as variáveis relevantes ao processo de secagem como a velocidade de circulação do ar, as temperaturas de bulbo seco e úmido, a umidade relativa e a perda de umidade das madeiras.

A medição da umidade das madeiras ocorre por quatro pares de pinos sensores (dois longos e dois curtos) totalizando dezesseis pinos sensores, os quais possuem o princípio de funcionamento resistivo. Os pinos foram introduzidos na madeira a  $1/2$  e a  $1/4$  da espessura das tábuas, no sentido perpendicular à grã, distantes 25 mm entre si, visando medir o gradiente de umidade durante o processo de secagem. A cada tábua que possuía os pinos sensores, era disposta de um par introduzido a  $1/2$  da espessura (pino longo) e outro par de pino sensor introduzido a  $1/4$  (pino curto) da espessura da tábua (Figura 15).



FIGURA 15 - Disposição da madeira no vagonete e dos pinos sensores na madeira

### 3.1.2 Preparação da carga (tábuas, empilhamento e medições)

Para a secagem da madeira em câmara convencional, as tábuas com dimensões nominais de 110 x 25 x 1550 mm (largura x espessura x comprimento) foram redimensionadas em 110 x 25 x 660 mm (largura x espessura x comprimento), sendo retirada amostras de 25 mm em cada extremidade da peça para determinação do teor de umidade inicial (Figura 16), totalizando 50 tábuas para cada ciclo de secagem. Foram realizados três (03) ciclos de secagem.

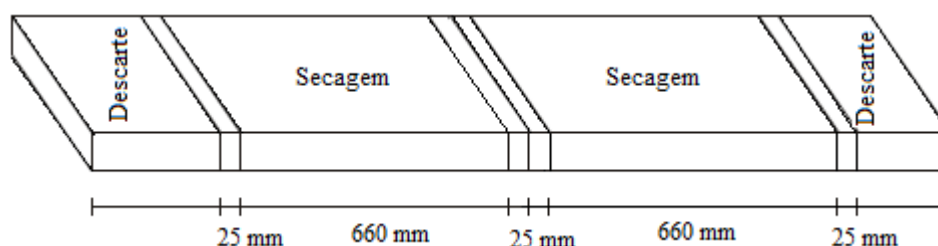


FIGURA 16 - Tábuas destinadas para a secagem em câmara convencional

Para o empilhamento da madeira no vagonete da câmara de secagem, as tábuas foram dispostas no sentido transversal ao fluxo de ar da câmara de secagem, alocadas sobre o vagonete e separadas por sarrafos separadores de seção quadrada de 30 mm e 1100 mm de comprimento.

A fim de verificar a perda de umidade das madeiras, bem como, as variações dimensionais em largura, espessura ao longo do ciclo de secagem, suas massas e dimensões foram aferidas no início e após a secagem. Para o controle gravimétrico da perda de umidade foram tomadas as medidas de cinco (05) amostras diariamente ao longo de todo o período da secagem. O monitoramento da variação dimensional foi realizado medições com auxílio de um paquímetro de 0,01 mm de precisão, sendo as medições realizadas a 50 mm das extremidades das peças.

### 3.1.3 Secagem da madeira a partir do programa elaborado

A secagem da madeira a partir do programa elaborado (Tabela 21) para as madeiras de teca (*Tectona grandis*) na câmara de secagem convencional, tomou-se como base os parâmetros obtidos no Capítulo 1. Descritos pela metodologia de Ciniglio (1998) e Jankowsky (2009), em que foram definidos a temperatura inicial de bulbo seco, temperatura final de bulbo seco, assim como, o potencial de secagem empregado.

TABELA 21 - PROGRAMA DE SECAGEM ELABORADO

Umidade da madeira (%)	Temperatura (°C)		Umidade relativa (%)	Umidade equilíbrio	Tempo (horas)	Potencial secagem
	TBS	TBU				
Aquecimento	44	44	100	-	3	-
45	44	42	88	18	-	2,4
40	46	43	84	16	-	2,5
34	48	44	79	14	-	2,4
28	50	44	70	12	-	2,4
25	53	46	66	10	-	2,4
22	55	46	62	9	-	2,3
18	58	46	51	8	-	2,4
15	60	45	44	6	-	2,3
12	63	44	34	5	-	2,4
10	67	43	28	4	-	2,3
Condicionamento	67	58	67	10	6	1,0
Resfriamento	44	36	51	10	3	-

Nota: TBS: temperatura bulbo seco; TBU: temperatura bulbo úmido.

Foi utilizado como velocidade de circulação do ar padrão para secagem em câmara convencional de  $2,5 \text{ m.s}^{-1}$  como descrito em diversos manuais de secagem de madeiras como Hildebrand (1970); Siau (1984); Simpson (1991).

### 3.2 AVALIAÇÃO DA SECAGEM EM CÂMARA CONVENCIONAL

As avaliações da secagem das madeiras foram realizadas de acordo com a taxa de secagem, umidade final, gradiente de umidade, presença de tensões de secagem e incidência de defeitos. Estas avaliações foram realizadas após 24 horas do término da secagem.



### 3.2.1 Taxa de secagem

A análise da taxa de secagem das madeiras foi realizada em função da perda de umidade (Tabela 23) com o tempo decorrido (horas) no intervalo, sendo expressa em porcentagem de umidade por hora ( $\%U \cdot h^{-1}$ ). Para tanto, utilizou-se os dados obtidos pelos conjuntos de pinos sensores, assim como, as amostras controle (gravimétrico) para estimar a umidade das madeiras para o cálculo da taxa de secagem de acordo com as recomendações de Simpson (1991). Foi quantificada a taxa de secagem para a perda de água capilar ( $U > PSF\%$ ), higroscópica ( $U < PSF\%$ ) e a capilar e higroscópica respectivamente ( $PSF\% > U < PSF\%$ ).

TABELA 22 - FAIXA TEOR DE UMIDADE PARA O CÁLCULO DA TAXA DE SECAGEM

Faixa de teor de umidade			
1	verde	até	28%
2	28%	até	10%
3	verde	até	10%

### 3.2.2 Umidade final, gradiente de umidade e tensões de secagem

Para a avaliação da umidade final, gradiente de umidade e tensões de secagem utilizou-se a metodologia proposta por Simpson (1991), conforme ilustra a Figura 18, em que foram utilizadas para cada programa de secagem avaliado 25 repetições, totalizando 225 amostras.

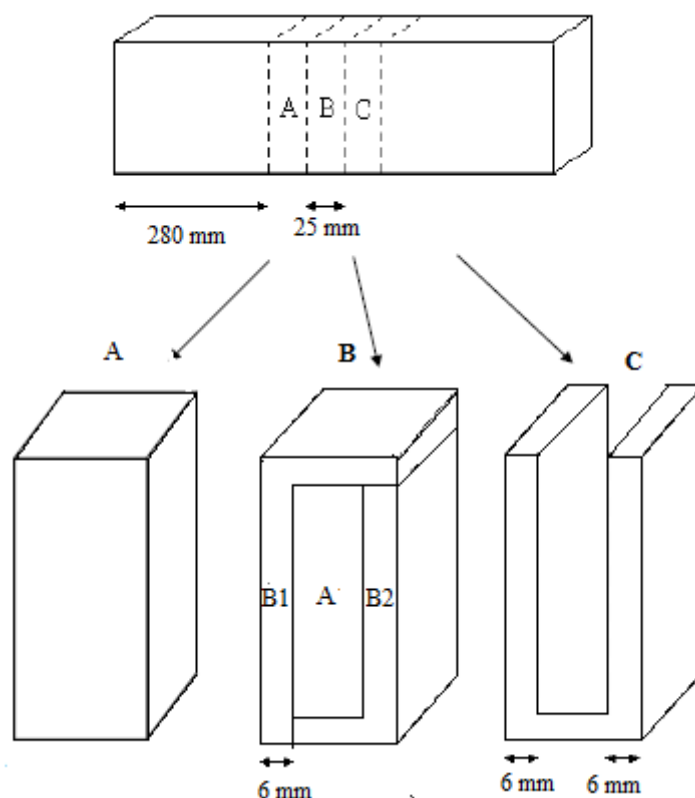


FIGURA 17 - Amostras para a avaliação da secagem de umidade final (A), gradiente de umidade (B) e tensões de secagem (C)

Fonte: Batista (2009), modificado.

Para cada tábua selecionada de forma aleatória em cada carga de secagem cortaram-se três amostras (A, B e C) com 25 mm na largura respectivamente. Todas as amostras demarcadas com a letra A foram utilizadas para a determinação da umidade final. As amostras demarcadas com a letra B foram utilizadas para a avaliação do gradiente de umidade, conforme recomendações de Simpson (1991), sendo portanto, reserradas. As amostras demarcadas em B1 e B2 foram utilizadas para a determinação da umidade da superfície das tábuas, enquanto, as amostras denominadas em A foram utilizadas para a determinação da umidade no centro da peça. Calculou-se em seguida, dois gradientes de umidade (G1 e G2), entre o corpo de prova A e B1 e entre A e B2, conforme as Equações 12 e 13. Todas as amostras em que foram aferidas a umidade, o procedimento de análise foi realizado pelo método gravimétrico, conforme recomendações da NBR 7190 (1997).

$$G1=UA-UB1 \quad (12)$$

$$G2=UA-UB2 \quad (13)$$

Onde:

G1 = gradiente de umidade 1 (%);

G2 = gradiente de umidade 2 (%);

UA = umidade no centro da peça (%);

UB1 e UB2 = umidade na superfície da peça (%).

EQUAÇÃO 12 - Gradiente de umidade 1

EQUAÇÃO 13 - Gradiente de umidade 2

As amostras demarcadas com a letra C (Figura 18) foram utilizadas para a avaliação das tensões de secagem, conforme recomendações de Simpson (1991), em que foram classificadas em madeira livre de tensões, madeira com tensões e madeira com tensões invertidas (Figura 19).

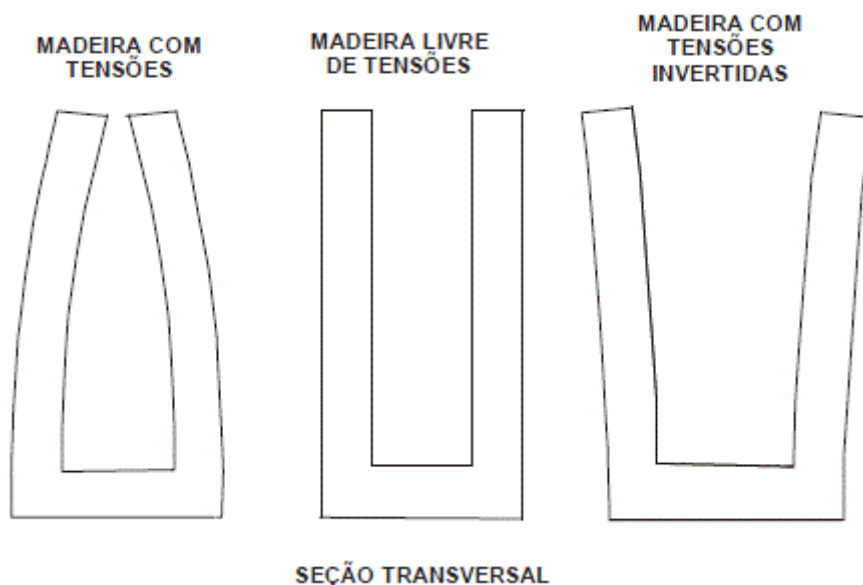


FIGURA 18 - Amostras para a avaliação das tensões de secagem

Fonte: Simpson (1991)

### 3.2.3 Incidência de defeitos

Para avaliar a incidência de defeitos proporcionados pela secagem das madeiras, foram realizadas duas (02) avaliações, em que, constituiu-se de uma avaliação antes do processo de secagem, seguida de uma segunda avaliação após a secagem das madeiras. Foram avaliadas todas as tábuas que continha a pilha de

madeira, correspondendo a 50 tábuas por secagem realizada, totalizando 150 tábuas avaliadas.

Realizou-se a primeira avaliação dos defeitos, foi-se necessária para a quantificação dos defeitos decorrentes do desdobro da madeira (empenamentos e rachaduras), em que, a mensuração dos defeitos ocasionados pela secagem foi realizada pela diferença dos resultados obtidos da segunda com a primeira avaliação realizada.

A mensuração dos defeitos proporcionados pela secagem (empenamentos, rachaduras e colapso) foram realizados conforme recomendações das normas NBR 12551: 2002 (Madeira serrada terminologia) e NBR 14806:2002 (Madeira serrada de eucalipto – Requisitos), os quais, compreenderam a determinação de empenamentos e rachaduras. Para a quantificação dos colapsos, a mensuração procedeu-se conforme recomendações de Ciniglio (1998), sendo avaliada sempre a pior face.

A quantificação e qualificação dos empenamentos, os quais, compreenderam o arqueamento, encurvamento e encanoamento, foram realizados conforme ilustra a Figura 20. Para o arqueamento e encurvamento, as tábuas que apresentaram valores acima de  $5 \text{ mm.m}^{-1}$  e para o encanoamento valores acima de  $4 \text{ mm.m}^{-1}$ , foram classificadas como defeituosas.

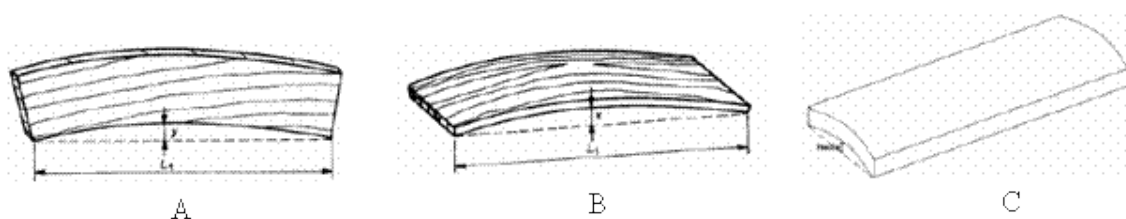


FIGURA 19 - Mensuração dos defeitos de empenamentos de arqueamento (A), encurvamento (B) e encanoamento (C)

Fonte: NBR 14806 (2002).

As rachaduras foram classificadas em rachaduras de superfície e rachaduras de topo.

As mensurações das rachaduras de superfície nas tábuas foram avaliadas visualmente, antes e após a realização da secagem, quanto à presença ou ausência. Quando detectado a presença, foi tomada sua dimensão individual de forma linear em milímetro, sendo os dados apresentados na forma de  $\text{mm.m}^{-1}$ , em

porcentagem do número de tábuas que apresentaram o defeito em relação ao total. Para as rachaduras de topo, realizou-se o mesmo procedimento (Figura 21).

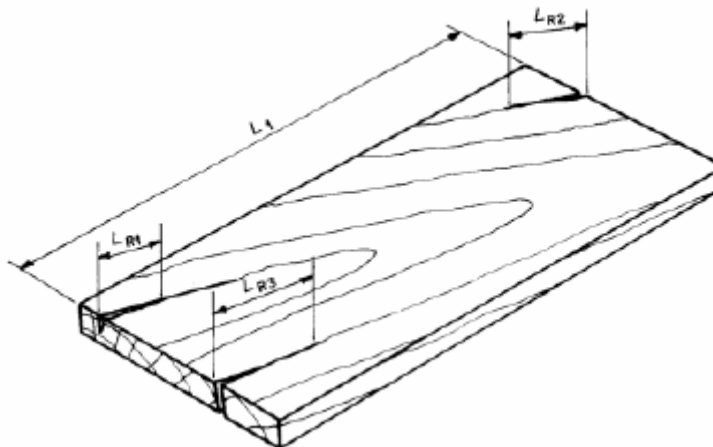


FIGURA 20 - Mensuração dos defeitos para rachaduras

Fonte: NBR 14806 (2002).

### 3.3 RETRAÇÃO DA MADEIRA

Para verificar o efeito da secagem na retração em largura e espessura das madeiras, considerou-se a madeira verde até o teor de umidade final desejado de 10%, conforme a Equação 14.

$$\text{Retração(\%)} = \frac{D_v - D_s}{D_v} * 100 \quad (14)$$

Onde:

$D_v$  = Dimensão em largura ou espessura verde [mm];

$D_s$  = Dimensão em largura ou espessura seca a 9% [mm].

EQUAÇÃO 14 - Retração das madeiras para a secagem em câmara convencional

Para esta situação, a dimensão seca das tábuas, referem-se ao teor de umidade final da carga de secagem, em função, do programa elaborado (10% de umidade).

### 3.4 ANÁLISE E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Para análise e avaliação dos resultados, procedeu-se análise de variância e nas situações em que a hipótese de nulidade ( $H_0$ ) foi rejeitada e quando detectada diferença estatística pelo teste F, aplicou-se o Teste de Tukey (5%) para a diferenciação das médias.

Com intuito de ilustrar a relação entre as variáveis envolvidas, procedeu-se uma análise de regressão, seleccionando o modelo que apresentou o melhor ajuste, levando-se em consideração o coeficiente de determinação e o erro padrão da estimativa.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 AVALIAÇÃO DO PROGRAMA DE SECAGEM

#### 4.1.1 Umidade inicial, tempo de secagem e massa específica aparente da madeira

Observa-se (Tabela 24) os valores de umidade inicial da madeira de teca que compunham as cargas de secagem para o programa avaliado, apresentaram diferenças estatísticas ao nível de 5% de significância. A terceira carga de secagem teve o maior valor (91,25%), seguido pelas cargas 1 e 2 (76,57 e 79,87%, respectivamente), que foram estatisticamente iguais.

TABELA 23 - TEOR DE UMIDADE INICIAL, TEMPO E MASSA ESPECÍFICA APARENTE A 10% PARA A MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*)

Cargas de secagem avaliadas	TUi (%)	Tempo (horas)	MEap 10% (g.cm <sup>-3</sup> )
1	76,57 a (30,52; 39,86)	126,92	0,52 a (0,04; 7,03)
2	79,87 a (27,15; 34,00)	139,83	0,54 a (0,06; 11,15)
3	91,25 b (32,34; 35,44)	105,08	0,52 a (0,05; 9,34)
Média	82,54 (30,03; 37,10)	123,94	0,53 (0,05; 9,42)

Nota: TUi: teor de umidade inicial; MEap: massa específica aparente. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão e coeficiente de variação respectivamente.

Apesar das diferenças entre as umidades iniciais, para a execução do programa de secagem inicia-se com a fase de aquecimento que teve um período de 6 horas, com 100% de umidade relativa. Esta fase de aquecimento tem o objetivo de promover não somente o aquecimento das madeiras, mas também, tornar-se homogêneo as umidades iniciais das madeiras pertencentes à carga. Portanto, as umidades iniciais, referem-se às umidades das madeiras que compunham a carga, e para o processo de secagem estas umidades foram elevadas pela fase de

aquecimento as tornando-as homogêneas para que não afetasse os valores de taxa de secagem.

Nota-se (Figura 22) a caixa box-plot para as umidades iniciais das madeiras, em que fica evidenciado que as umidades iniciais possuem os desvios padrões homogêneos, assim como, as meridianas semelhantes, não havendo discrepâncias entre as umidades. Para que se obtenha uma secagem de forma uniforme entre as madeiras que compõe a carga, é importante que as umidades iniciais das madeiras, estejam semelhantes.

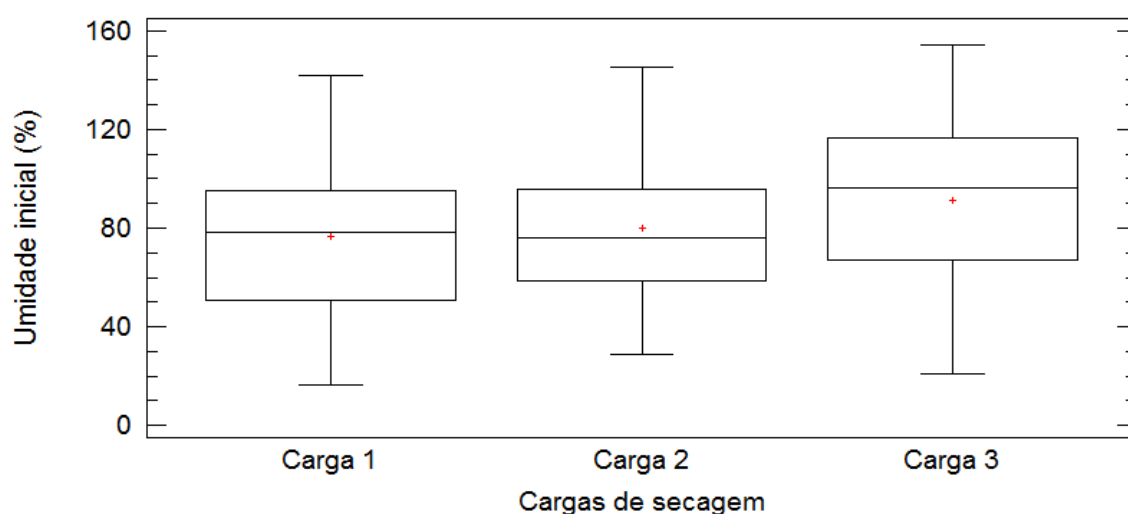


FIGURA 21 - Variação do teor de umidade inicial das madeiras de teca (*Tectona grandis*) submetida à secagem em câmara convencional de secagem

As umidades iniciais das madeiras do presente estudo, condizem com as umidades iniciais citadas na literatura para madeiras da mesma espécie. Arruda (2014) avaliando a secagem das madeiras de teca provenientes de desbastes com diferentes idades, obteve umidades iniciais para as madeiras em torno de 80%. Loiola et al., (2015) avaliando a secagem em estufa solar de três espécies madeireiras, encontrou valores de umidade inicial para madeiras de teca de 115%, enquanto, Salás; Moya (2014), avaliando três métodos de secagem para a espécie encontrou valores de umidades iniciais de 57 a 84%. Braz et al. (2015) estudando curvas de secagem da madeira de *Tectona grandis* ao ar livre, obteve valores próximos a 71% de umidade inicial. Os valores de umidades iniciais de madeiras, no entanto, são influenciados pelo tempo de abate das árvores, permanência das toras



para o desdobro e conseqüentemente, pelo tempo de preparo das amostras para as aferições de umidades.

Observa-se (Tabela 24), que os tempos de secagem para a madeira de teca no programa utilizado conforme as recomendações de Ciniglio (1998), teve um ciclo de secagem médio de 123,94 horas. Nota-se diferença de 34,75 horas, para os ciclos de secagem das cargas 2 e 3 respectivamente (Figura 23).

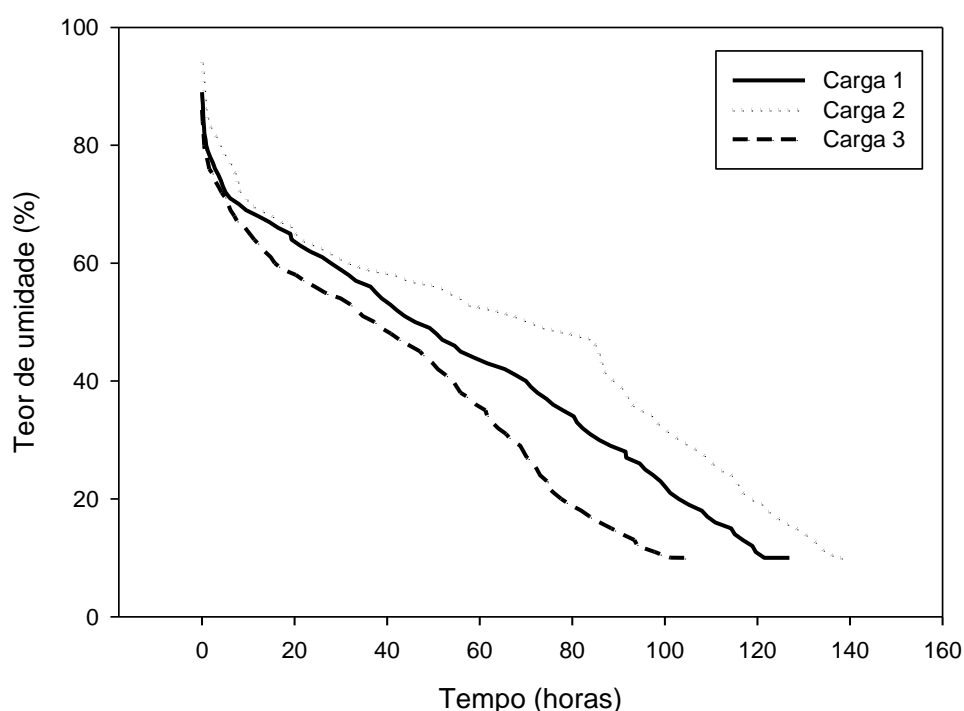


Figura 22 - Tempo de secagem da madeira de teca (*Tectona grandis*) em função dos programas de secagem avaliados submetida à secagem em câmara convencional de secagem

Ao analisar a massa específica aparente a 10% de umidade das madeiras de teca (*Tectona grandis*) provenientes das tábuas secas nos diferentes programas de secagem avaliados, observa-se (Tabela 24, Figura 24) que as madeiras tiveram como média geral de 0,53 (g.cm<sup>-3</sup>). As madeiras que compunham à primeira e a terceira carga de secagem, tiveram as menores massa específicas aparentes a 10% (0,52 g.cm<sup>-3</sup>), enquanto às madeiras que compunham à segunda carga, apresentaram as maiores massas específicas aparentes a 10% (0,54 g.cm<sup>-3</sup>). Verificou-se, no entanto, que não houve diferença estatística entre a massa específica aparente a 10% entre as cargas de madeira de teca (*Tectona grandis*).

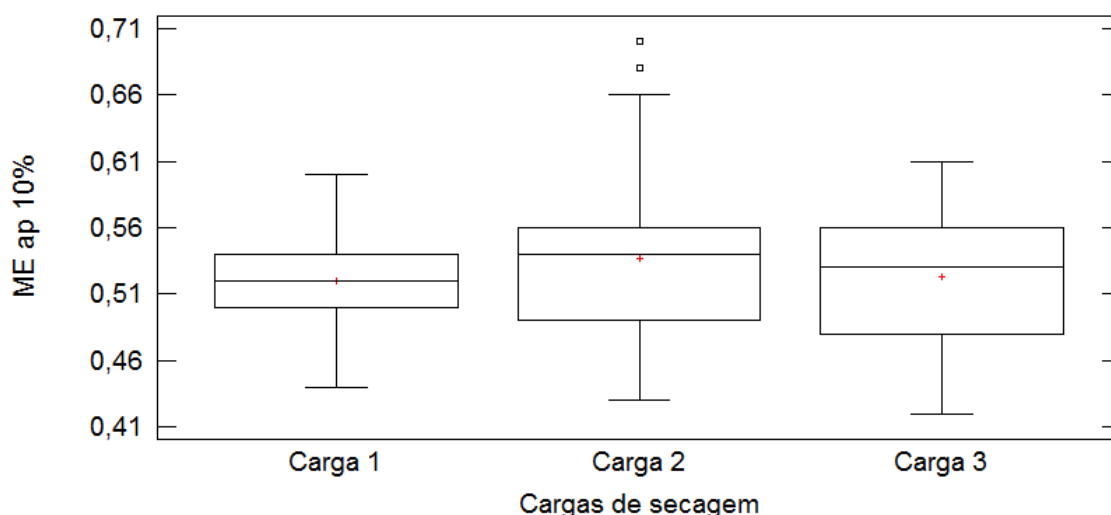


FIGURA 23 - Massa específica aparente a 10% da madeira de teca (*Tectona grandis*) das tábuas secas em câmara convencional de secagem

Nota: MEap: massa específica aparente.

A massa específica aparente a 10% de umidade das tábuas de teca, seguem a mesma tendência das massas específicas aparente a 12% de umidade ( $0,56 \text{ g.cm}^{-3}$ ), das amostras confeccionadas conforme preconizada as normas da COPANT (1972), demonstrado no Capítulo 1. Flórez et al. (2014) estudando a madeira de teca, obteve valores de  $0,54 \text{ g.cm}^{-3}$ .

A massa específica da madeira pode ser considerada como resultante da interação das propriedades anatômicas e química da madeira. Panshin; De Zeeuw (1980) ainda complementam que as variações da densidade são provenientes das diferenças nas dimensões celulares, assim como, pela quantidade de extrativos presentes por unidade de volume na madeira. A massa específica da madeira, afeta de forma significativa a secagem das madeiras, sendo que, madeiras que possuem elevadas massas específicas, são madeiras menos permeáveis, pelo fato de possuírem maior quantidade de material lenhoso por unidade de volume.

#### 4.1.2 Taxa de secagem

A taxa de secagem da madeira de teca (*Tectona grandis*) para a remoção da água capilar foi de 3,1958; 2,5620 e 2,9918  $\%U.h^{-1}$ , respectivamente, para as cargas 1; 2 e 3, tendo taxa de secagem média de 2,9165  $\%U.h^{-1}$  (Tabela 25). A menor velocidade do fluxo de capilaridade ocorrido na segunda carga de secagem, pode

estar relacionado à maior massa específica aparente a 10% ( $0,54 \text{ g.cm}^{-3}$ ) sendo superior às massas específicas das madeiras de teca (*Tectona grandis*) pertencentes às demais cargas.

TABELA 24 - TAXA SECAGEM DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*) ENTRE OS PROGRAMAS DE SECAGEM AVALIADOS EM FUNÇÃO DO TIPO DE REMOÇÃO DE ÁGUA

Cargas de secagem avaliadas	Taxa de secagem da madeira (%U.h <sup>-1</sup> )		
	Verde a 28%	28% a 10%	Verde a 10%
Carga 1	3,1958	0,6616	2,5218
Carga 2	2,5620	0,6014	2,0297
Carga 3	2,9918	0,8135	2,4109
Média	2,9165	0,6922	2,3208

Nota: U: umidade; h: hora.

A massa específica é uma variável de muita importância na taxa de secagem, pois normalmente quanto maior a massa específica menor a permeabilidade da madeira e mais lenta deverá ser secagem, seja natural ou artificial (Braz et al., 2015). No entanto, Klitzke (2007), relatou que podem ocorrer exceções ocasionadas por características de permeabilidade, como a presença de algumas substâncias no interior das células.

Este aumento verificado nos valores de taxa de secagem para as madeiras pertencentes à terceira carga em relação aos valores correspondentes de taxa de secagem para as cargas 1 e 2, também pode ser em função do maior tempo decorrido no processo de secagem (126,92 e 139,83 horas), formou-se menores gradientes de umidade, conseqüentemente as menores taxas de secagem. O gradiente de umidade está diretamente relacionado com o fluxo molecular de massa em um estado constante no espaço e no tempo (SIAU, 1984).

A taxa de secagem média para a remoção da água de difusão da madeira de teca (*Tectona grandis*) foi de  $0,6922 \text{ \%U.h}^{-1}$ , tendo os valores de taxa de secagem de  $0,6616$ ;  $0,6014$  e  $0,8135 \text{ \%U.h}^{-1}$ , para as cargas 1; 2 e 3, respectivamente. Nota-se que o fluxo da água capilar foi quatro vezes superior ao fenômeno físico de difusão, o qual é regido pela Segunda Lei de Fick, sendo considerado como um fluxo em estado não constante, sendo o fluxo e o gradiente de concentração variáveis no tempo e no espaço (SIAU, 1984).

Esta mesma proporção da velocidade de remoção da água capilar foi encontrada para os ensaios de elaboração do programa de secagem (Capítulo 1. Item 4.2.1 – Umidade inicial, tempo e velocidade de secagem).

Susin (2012) estudando madeiras do gênero *Eucalyptus*, encontrou para o *Eucalyptus robusta*, velocidade de secagem para a remoção da água capilar cerca de duas vezes o fluxo de fluido para a água de difusão. Batista (2009), estudando a espécie *Eucalyptus dunnii*, obteve o fluxo de fluido por capilaridade de aproximadamente três vezes ao fluxo por difusão. Arruda (2014) estudando madeira de jovem de teca (*Tectona grandis*), encontrou relações menores, sendo a velocidade de remoção da água capilar o dobro da velocidade de remoção da água de impregnação da madeira.

Esta divergência aos resultados encontrados por Arruda (2014) pode estar relacionada ao programa de secagem elaborado pelo autor, sendo um programa de secagem com temperaturas inferiores e com potencial de secagem médio mais ameno do que ao elaborado nesta pesquisa.

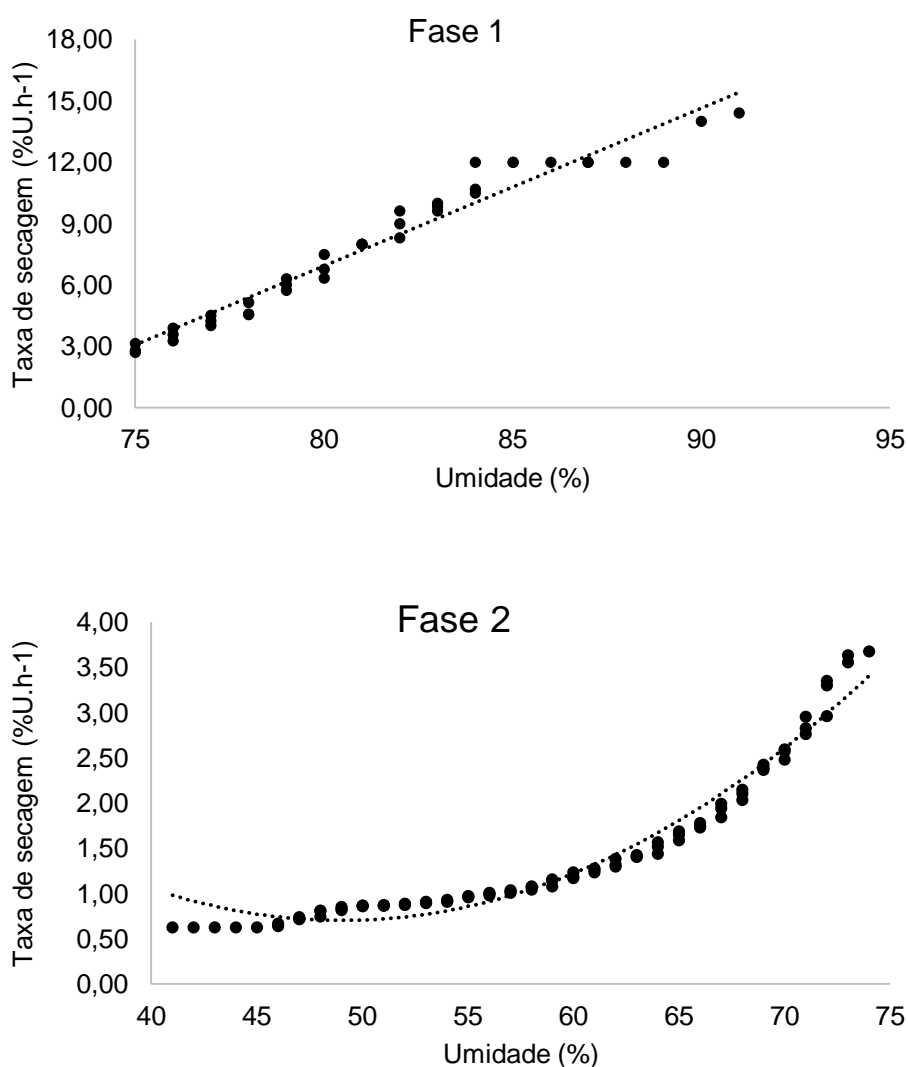
A taxa de secagem média da madeira, desde sua condição verde até 10% de umidade (água capilar e higroscópica), sendo os valores de taxa de secagem de 2,5218; 2,0297 e 2,4109 %U.h<sup>-1</sup>, respectivamente, para as cargas 1; 2 e 3. A taxa de secagem média das madeiras são influenciadas de forma mais proeminente pela velocidade de secagem da água capilar, sendo que, quanto maior a velocidade de remoção deste tipo de água, maior será a taxa de secagem média da madeira.

No entanto diversos autores (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985, SIMPSON, 1991; KLITZKE, 2007) relataram os cuidados que devem ser tomados para a remoção da água capilar da madeira, principalmente no início do processo de secagem. Em que, a madeira se encontra susceptível a incidência de defeitos como empenamentos, colapsos e rachaduras (topo e superfícies).

Na Figura 25, é demonstrado a tendência da taxa de secagem para a madeira de teca (*Tectona grandis*) para cada tipo de água removida, tendo a secagem iniciando à temperatura de 44°C, finalizando com 67°C, com velocidade de circulação de ar 2,5 m.s<sup>-1</sup> e potencial de secagem de 2,4. Na ilustração fica demonstrado a tendência da cinética da secagem em cada fase. Severo (1989) no entanto, enfatizou que a taxa de secagem para madeiras segue uma tendência de forma linear em função do tempo durante todo o período considerado, é

perfeitamente válida para os objetivos do estudo, pois, serve de parâmetro de comparação entre as velocidades de circulação de ar abaixo do PSF das madeiras.

A fase linear (fase 1), ocorre nas primeiras horas de secagem, quando a umidade das madeiras ainda está elevada, e a partir do momento que aumenta o gradiente de umidade entre as regiões contíguas da peça, inicia-se a fase 2 da secagem, ocorrendo desta forma a tendência parabólica, perdendo importância, quando o teor de umidade das madeiras se aproximam do PSF, iniciando a fase 3 da secagem, tendo uma tendência exponencial.



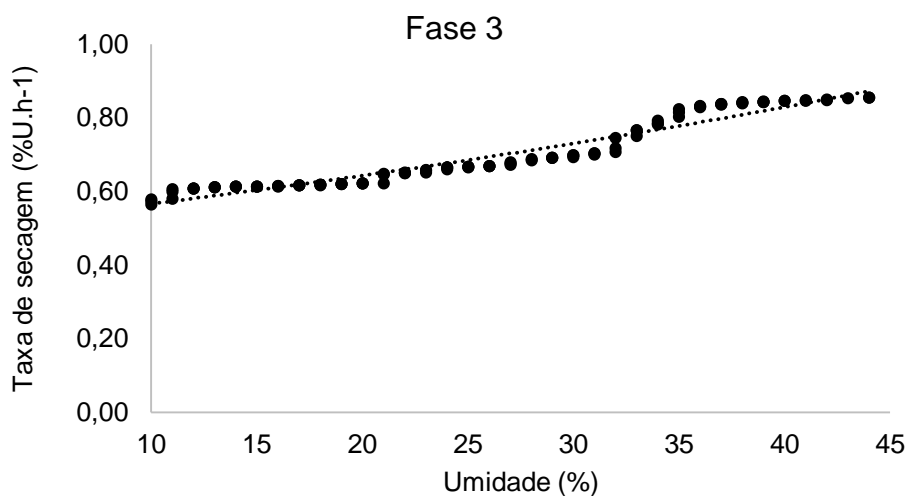


FIGURA 24 - Tendência da taxa de secagem da madeira de teca (*Tectona grandis*) em função da umidade

Os modelos ajustados para a taxa de secagem das madeiras de teca (Tabela 26), seguem a tendência da cinética da secagem como descrito por Siau (1984); Galvão; Jankowsky (1985); Simpson (1991); Klitzke (2007); Mellado (2007). Na primeira fase da secagem, a taxa de secagem ocorre de forma linearmente ( $Y = a + b \cdot X$ ), o coeficiente de determinação ajustado se encontra acima de 90%, tendo como o maior erro padrão da estimativa de 0,57%.

TABELA 25 - MODELOS MATEMÁTICOS AJUSTADOS EM FUNÇÃO DA CINÉTICA DA SECAGEM DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*) PARA OS PROGRAMAS AVALIADOS

Cinética da secagem	Modelos ajustados	$R_{aj}^2$ (%)	$S_{yx}$ (%)	F
Linear	$Ts = -54,7137 + 0,770598 \cdot \text{Umidade}$	95,65	0,57	8,5862**
Parabólica	$Ts = 1/(3,3621 - 0,0422965 \cdot \text{Umidade})$	98,61	0,03	6188,89**
Exponencial	$Ts = \exp(-1,06877 + 0,00385235 \cdot \text{Umidade})$	93,49	0,02	1395,69**

Nota: Ts: taxa de secagem (%U.h<sup>-1</sup>); exp: exponencial;  $R_{aj}^2$ : coeficiente de determinação ajustado.  $S_{yx}$ : erro padrão da estimativa. F: fator de significância.

Para a segunda fase da secagem, a taxa de secagem apresenta uma tendência parabólica, o modelo de regressão que melhor se ajusta à espécie estudada, foi  $[Y = 1/(a + b \cdot X)]$ , portanto uma função hiperbólica, tendo o coeficiente de determinação, acima de 98%, com o maior erro padrão da estimativa de 0,03%. A umidade da madeira ao se aproximar do PSF, inicia-se a taxa de secagem segue uma tendência exponencial  $[Y = \exp(a + b \cdot X)]$ , tendo o modelo ajustado

correspondendo de forma satisfatória a tendência da taxa de secagem, com coeficiente de determinação acima de 93% e erro padrão da estimativa de 0,02%.

#### 4.1.3 Retração da madeira de teca (*Tectona grandis*)

A madeira de teca (*Tectona grandis*) obteve retração em largura após a secagem de 1,93; 1,97 e 2,04%, para a primeira, segunda e terceira carga respectivamente, sendo a retração média de 1,98% (Tabela 27). Nota-se que a diferença da retração em largura das tábuas entre as cargas de secagem foi de 5% que pode ser atribuída à aleatoriedade das tábuas amostradas. No entanto, esta diferença se encontra dentro do esperado, visto o desvio padrão dos resultados (0,51).

TABELA 26 - RETRAÇÃO DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*) EM LARGURA, ESPESSURA, COMPRIMENTO E VOLUMÉTRICO EM FUNÇÃO DAS CARGAS DE SECAGEM AVALIADAS

Cargas de secagem avaliadas	Retração da madeira (%)			
	Largura	Espessura	Comprimento	Volumétrico
Carga 1	1,93	1,14	0,13	3,12
	(0,42) (21,64)	(0,51) (44,64)	(0,11) (81,60)	(0,86) (27,50)
Carga 2	1,97	1,60	0,08	3,55
	(0,57) (28,88)	(0,60) (37,56)	(0,08) (101,02)	(0,97) (27,36)
Carga 3	2,04	1,33	0,14	3,40
	(0,54) (26,34)	(0,37) (28,04)	(0,10) (71,84)	(0,83) (24,53)
Média	1,98	1,36	0,14	3,36
	(0,51) (25,78)	(0,53) (39,30)	(0,09) (85,80)	(0,90) (28,86)

Nota: Valores entre parêntesis correspondem ao desvio padrão e coeficiente de variação, respectivamente.

Em função do modelo de desdobro realizado para a obtenção das tábuas, foi observado que a maioria das peças utilizadas nesta pesquisa, foram tábuas tangenciais, podendo assim, realizar comparações com outros estudos referentes à retração da madeira de teca (*Tectona grandis*), provenientes de plantios de outras regiões. A retração em largura média para as madeiras foi de 1,98%, corroborando

com os valores obtidos por Floréz et al. (2014) ao caracterizar madeiras jovens de teca obtiveram retração tangencial a 12% de umidade valores de 2,30%, assim como, Valero et al. (2005) que obtiveram retração tangencial para madeiras de teca provenientes de Barinas (Venezuela) de 3,37%. Wanneng et al. (2014) ao estudarem madeiras de teca de diferentes idades, chegaram a resultados de 2,68% para retrações até 12% de umidade para madeiras de 15 anos.

Para a retração em espessura das tábuas (Tabela 27), a madeira de teca (*Tectona grandis*) teve retração média de 1,36%, sendo as cargas avaliadas (carga 1; 2 e 3) valores de retrações de 1,14; 1,60 e 1,33%, respectivamente. Esta diferença de retração das madeiras que compunham a primeira e a terceira carga, para com as madeiras pertencentes à segunda carga, pode ser em função de algumas tábuas serem radiais, proporcionando portanto, maiores retrações em sua espessura, já que na espessura as tábuas estão orientadas de forma tangencial.

A retração em espessura média de 1,36%, corrobora com os valores obtidos Floréz et al. (2014) que obtiveram retração radial a 12% de umidade valores de 1,17%, enquanto Motta (2011), obteve valores de retração radial de 1,35%, para madeiras provenientes da região do Vale do Aço, Minas Gerais. Wanneng et al. (2014), encontraram retração radial para madeiras com 25 anos de 1,54%.

Já a retração no comprimento das tábuas após a secagem, nota-se valores de 0,08% a 0,14%, respectivamente para a segunda e terceira carga, enquanto a primeira carga teve retração de 0,14%. Na média geral, as madeiras de teca tiveram retração de 0,11% em seu comprimento.

A retração volumétrica média para as madeiras foi de 3,36%, estando em acordo com os valores obtidos Floréz et al. (2014) que obtiveram retração volumétrica a 12% de umidade valores de 3,57%, porém, inferior aos valores obtidos por Motta (2011), que encontrou valores de retração volumétrica de 4,12%.

#### **4.1.4 Umidade final, gradiente de umidade e tensões de secagem**

Analizando o teor de umidade final das madeiras (Tabela 28, Figura 26), após as secagens, o programa elaborado, foi elaborado com teor de umidade final da carga em 10%. No entanto, não foi observado este valor de umidade final em nenhuma carga de secagem avaliada.



TABELA 27 - UMIDADE FINAL, GRADIENTE DE UMIDADE E TENSÕES DE SECAGEM PARA A MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*) PARA O PROGRAMA DE SECAGEM ELABORADO

Cargas de secagem avaliadas	Umidade final (%)	Gradiente de umidade (%)		Tensões de secagem (%)		
		1	2	Ausência	Suave	Forte
Carga 1	11,87 (0,84; 7,05)	0,77 (0,48)(62,36)	0,77 (0,61)(79,16)	84,62	11,54	3,85
Carga 2	12,20 (1,49; 12,19)	1,16 (0,88)(75,72)	1,40 (1,26)(89,84)	69,23	30,77	0,00
Carga 3	12,83 (1,32; 10,25)	1,43 (0,86)(59,96)	1,61 (0,76)(47,07)	69,23	19,23	11,54
Média	12,30 (1,11; 8,96)	1,12 (0,79; 71,31)	1,26 (0,97; 77,25)	74,36	20,51	5,13

Nota: Valores entre parêntesis correspondem ao desvio padrão e coeficiente de variação, respectivamente.

A carga de secagem que mais se aproximou do teor de umidade final desejado, foi a primeira carga de secagem (11,87%). As demais cargas avaliadas (carga 2 e 3) tiveram teores de umidades finais (12,20 e 12,83) respectivamente, sendo o teor de umidade médio das madeiras de teca (*Tectona grandis*) de 12,30%.

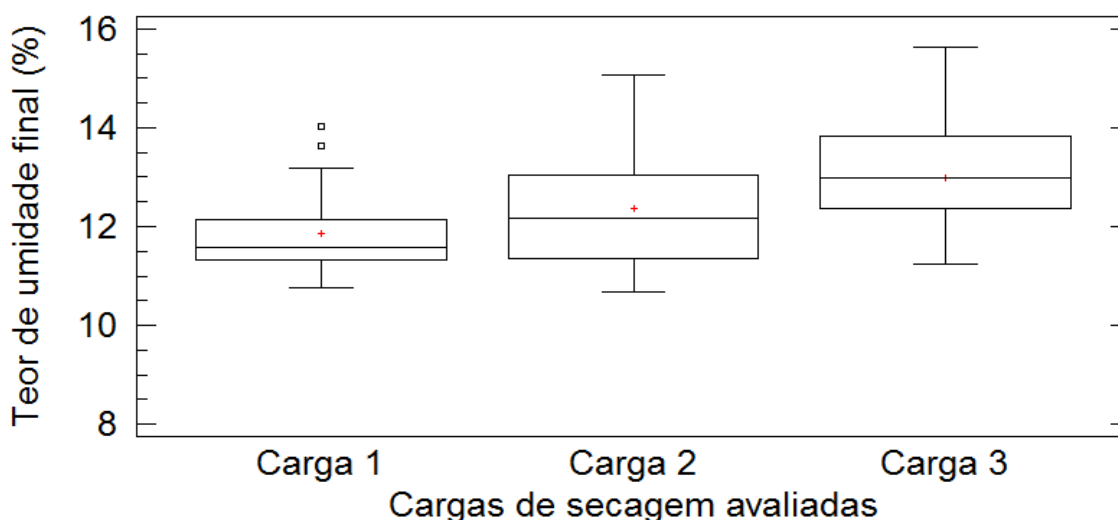


FIGURA 25 - Umidade final das madeiras de teca (*Tectona grandis*) submetida à secagem em câmara convencional de secagem

A justificativa pelo aumento das umidades finais em todas as cargas de secagem, pode ter sido a forma em que foi conduzida a etapa de condicionamento no final do processo de secagem, mesmo utilizando-se a umidade de equilíbrio inferior à umidade desejada para a finalização do processo, o tempo de condicionamento adotado (seis horas) não proporcionou a uniformização da umidade da madeira. Porém, a programação da etapa de condicionamento das madeiras, seguiram as recomendações dos principais manuais de secagem de madeiras em câmaras convencionais.

Observa-se (Figura 27) a variação do teor de umidade das amostras nas superfícies (S1 e S2) e na região central das madeiras. As madeiras secas na primeira carga de secagem tiveram a variação da umidade entre as superfícies e a região central da madeira, sendo esta variação de 0,77% (Tabela 28). Já as madeiras secas na segunda carga tiveram gradientes de umidade de 1,16 e 1,40%, respectivamente entre as superfícies externas e a parte central da madeira.

Enquanto a terceira carga de secagem, foi a que apresentou as maiores variações da umidade entre a região central e periférica da madeira, formando-se um gradiente de umidade de 1,43 e 1,61%, respectivamente (Tabela 24). Tais diferenças apresentadas pelas regiões periféricas da madeira, pode estar relacionada à velocidade do fluxo de fluido entre as pilhas de madeira no interior da câmara de secagem. Em que a velocidade de ar projetada na superfície da hélice do ventilador é maior que a velocidade do ar na região central da hélice. Aliado a este fato, há um movimento turbulento do fluxo de fluido heterogêneo ao longo de toda a extensão da pilha de madeira.

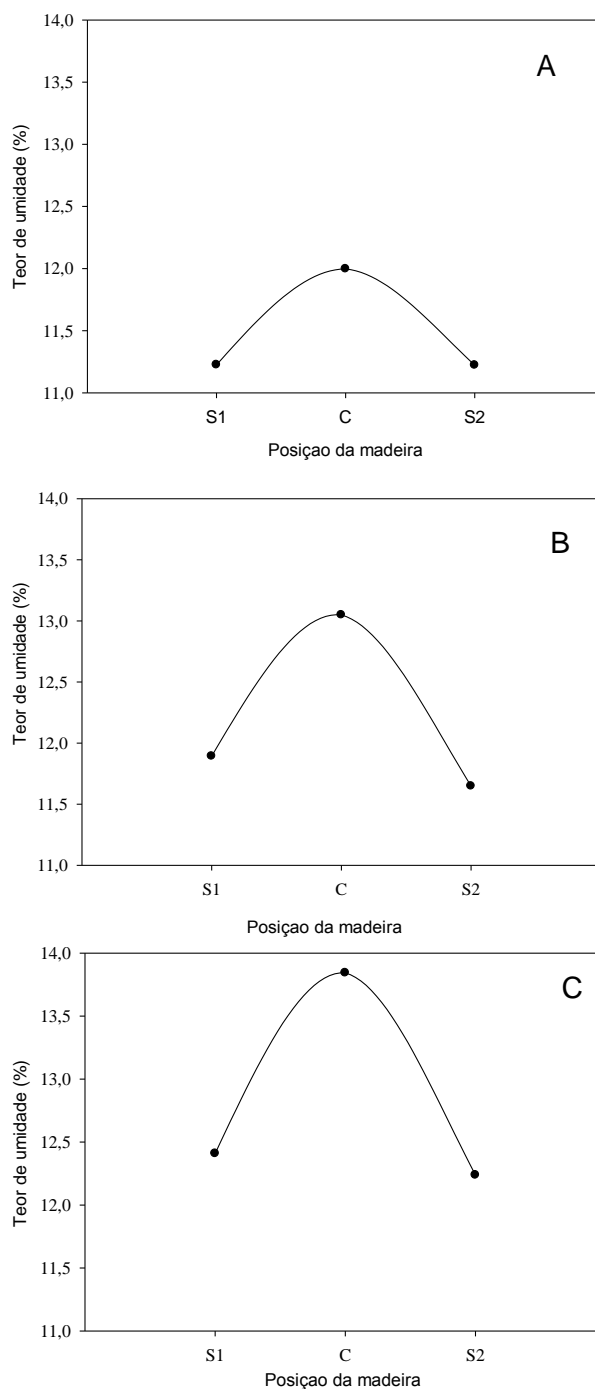


FIGURA 26 - Teor de umidade das superfícies (S1 e S2) e na região central da madeira de teca (*Tectona grandis*) após a secagem para as cargas 1 (A), 2 (B) e 3 (C)

Batista (2009) avaliando a secagem em câmara convencional do gênero *Eucalyptus*, obteve gradiente de umidade de 0,58 a 2,37%, para madeira de *Eucalyptus grandis* e *E. dunnii*, respectivamente. O autor utilizou os mesmos parâmetros para a etapa de condicionamento da madeira que esta pesquisa.

Susin (2012) em seu estudo também avaliou a qualidade da etapa de uniformização da madeira de duas espécies de *Eucalyptus* e uma espécie do gênero *Corymbia* ao final da secagem, sendo que após a etapa de uniformização conseguiu reduções do gradiente de umidade 49,60% e 62,97%, respectivamente para o *Eucalyptus robusta* e *saligna*. Enquanto para o *Corymbia citriodora*, obteve redução do gradiente de 49,6%. Fica evidente da importância da realização desta etapa ao final do processo de secagem de madeiras.

Entretanto, os gradientes de umidades determinados pelo autor foram de 1,26 e 3,78% para madeiras de *Eucalyptus robusta* e *saligna* enquanto, para o *Corymbia* foi de 4,74%, esta diferença da região central com a região periférica da madeira.

Para as tensões de secagem, foi verificado a presença e ausência do tensionamento nas amostras avaliadas. Quando detectado a presença, as amostras tensionadas foram classificadas de duas formas (suave e forte), sendo a tomada de decisão para a classificação de forte, determinada quando as extremidades das amostras se tocavam.

O gradiente de umidade formado nas madeiras, está diretamente relacionado com a presença de tensões de secagem (Tabela 28), no qual, quanto maior o gradiente, maior a incidência tensões de secagem nas madeiras de teca (*Tectona grandis*).

As madeiras secas utilizando os parâmetros de secagem segundo a metodologia de (CINIGLIO, 1998), sendo a secagem ocorrendo de forma lenta e gradativa. Analisando de uma forma geral, 74,36% das amostras avaliadas não tiveram tensões de secagem e apenas 5,13% apresentaram tensões de secagem em sua intensidade acentuada (forte).

Madeiras que apresentam tensões de secagem tem-se as suas superfícies sob compressão, enquanto a região central sob forças de tração. Outro fato relevante, é que o gradiente de umidade também está relacionado ao tempo de condicionamento utilizado nesta pesquisa (6 horas), o qual ainda há uma carência quanto à sua elucidação, no que se refere, a influência da velocidade de secagem com o tempo de condicionamento e há umidade de equilíbrio em que se deve utilizar para esta etapa de secagem. Foi utilizada nesta pesquisa a umidade de equilíbrio de 11%, sendo que a injeção de vapor saturado no ambiente de secagem, ocasionou o aumento o teor de umidade final das madeiras.

Outro fato ligado ao gradiente de umidade e as tensões de secagem é que ambas se correlacionaram diretamente com os defeitos de secagem, no qual quanto maior o gradiente de umidade, mais tensionadas está a madeira, consequentemente maiores os índices de defeitos.

#### **4.1.5 Defeitos de secagem**

##### **4.1.5.1 Rachaduras de topo e de superfície**

As madeiras de teca (*Tectona grandis*) não apresentaram rachaduras de topo, assim como, rachaduras de superfície em nenhum dos programas de secagem avaliados. As prováveis justificativas para o não surgimento de rachaduras nas tábuas, podem estar ligados à origem para o surgimento das rachaduras, assim como, aos fatores intrínsecos à espécie estudada.

A formação de rachaduras nas madeiras, provenientes da secagem, normalmente, são originárias pelos gradientes de umidades formados (SKAAR, 1988; GALVÃO JANKOWSKY, 1985; DENIG et al., 2000). No caso das rachaduras de topo, pelo fato do fluxo de fluidos no sentido longitudinal das madeiras ser mais proeminente, fazendo com que as extremidades das tábuas mais secas, estejam sob forças de tração, enquanto às camadas mais úmidas, sob forças de compressão, consequentemente, o rompimento das camadas celulares, surgindo assim as rachaduras (SIMPSON, 1991).

Malan (1995) e Lima et al. (2004), ainda complementam que, quanto maior a massa específica da madeira, maiores são os níveis de tensão de crescimento, sendo que a deformação residual longitudinal (DRL), decorrente das tensões de crescimento, apresenta importante relação com a magnitude da incidência de rachaduras. Com o aumento da DRL na árvore em pé, maior é a incidência de rachaduras na madeira serrada.

Concomitantemente, dever ser considerado que a madeira de teca (*Tectona grandis*), apresenta grã retilínea, o que segundo Klitzke (2007), madeiras com fibras paralelas ao eixo de orientação, seu comportamento durante a secagem reduz significativamente a presença de defeitos de rachaduras e empenamentos. Entretanto, pode-se enfatizar a observações de Galvão; Jankowsky (1985) no qual, afirmaram, que as rachaduras aparecem como consequências da diferença de

contração nas direções radial e tangencial da madeira e de diferenças de umidade entre regiões contíguas de uma peça, durante o processo de secagem.

Os diferentes programas de secagem avaliados, foram adequadamente elaborados para esta variável (surgimento de rachaduras), sendo que, uma das maiores dificuldades durante a secagem de madeiras é a elaboração de curvas de secagem que proporcionem a otimização dos tempos de secagem, assim como, atendam a qualidade do produto a ser manufaturado.

#### 4.1.5.2 Empenamentos

Foi avaliado os defeitos de empenamentos após a secagem em câmara convencional para as três cargas, sendo plotado o gráfico (Figura 28) para os defeitos de arqueamento, encurvamento e encanoamento médio das cargas avaliadas.

Avaliando o defeito por empenamento da madeira do tipo arqueamento, nota-se que a madeira de teca (*Tectona grandis*) teve em média 0,40 mm.m<sup>-1</sup>.

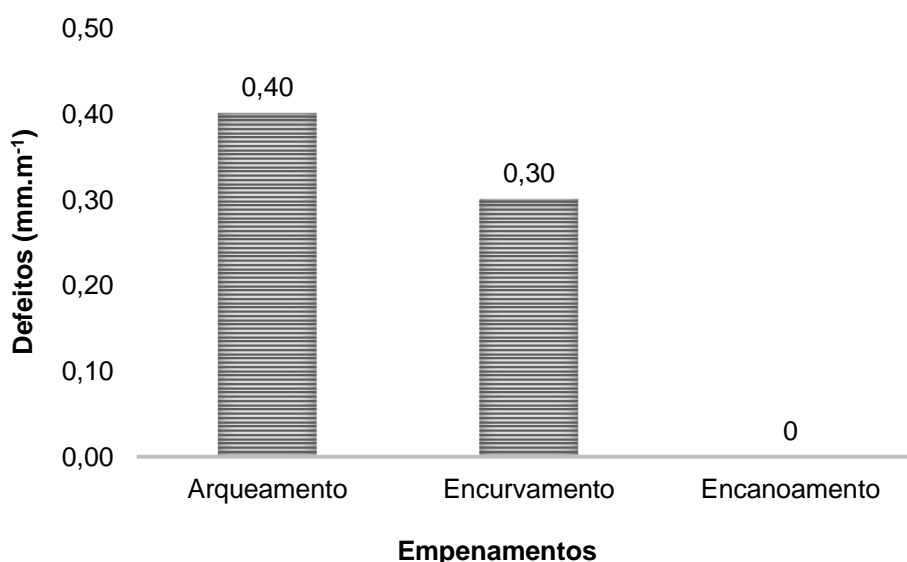


FIGURA 27 – Defeitos da madeira de teca (*Tectona grandis*) após a secagem em câmara convencional

Conforme a NBR 14806 (2002), há uma tolerância para a flecha do arqueamento em madeiras de folhosas de até 5 mm.m<sup>-1</sup>, no entanto, o índice de arqueamento verificado neste trabalho foi de 0,40 mm.m<sup>-1</sup>, valor este, 92% menor

que o limite de tolerância indicado pela norma, o que podemos concluir que 100% das tábuas submetidas ao à secagem deste trabalho estão aptas ao processo de manufatura.

Em função do arqueamento ser caracterizado pela curvatura ao longo do comprimento da tábua em sua extremidade (MARTINS, 1988), o qual é originário pela diferença de retração longitudinal entre as porções laterais da tábua, podendo ser causado pela diferença de lenhos (juvenil e adulto) na mesma peça, tornando mais susceptível ao desenvolvimento deste defeito no processo de remoção de umidade da madeira, visto que os mesmos apresentam comportamentos distintos quanto a contrações durante a secagem (SUSIN, 2012).

Lima (2005) ainda enfatiza que o arqueamento pode ser minimizado durante a secagem, tendo-se procedimentos adequados desde o momento de desdobro das toras, no qual, toras que apresentam assimetria de medula, deve tomar cuidados com o posicionamento correto das toras no carro porta toras.

Existem na literatura alguns trabalhos referentes a secagem de madeiras em que não foi verificado a ocorrência de arqueamento nas madeiras avaliadas, como o de Andrade (2000), em que se elaborou programas de secagem para madeiras de Freijó (*Cordia goeldiana* Huber), Jutaí-cica (*Martiodendron elatum* Ducke) e Peroba-mica (*Aspidosperma* sp.), onde não foi constatado a presença de arqueamento para estas espécies.

Severo (1998) estudando o gênero *Eucalyptus*, em que, avaliou três programas de secagem, constatou que o programa de secagem elaborado de forma mais suave, o defeito de arqueamento na madeira de *Eucalyptus grandis* não foi superior a  $5 \text{ mm.m}^{-1}$ . No entanto, para os dois programas mais severos o autor encontrou de 5 a 7,5% de tábuas que tiveram arqueamento superior a  $5 \text{ mm.m}^{-1}$ . Susin (2012) encontrou para madeiras de *Corymbia citrodora* flecha de arqueamento após a secagem em câmara convencional de  $1,34 \text{ mm.m}^{-1}$ , enquanto, para madeiras de *Eucalyptus robusta* e *E. saligna* flechas de 1,48 e  $0,52 \text{ mm.m}^{-1}$ , respectivamente.

Para o defeito de encurvamento da madeira de teca (*Tectona grandis*) após a secagem em câmara convencional, observa-se que a madeira teve um índice médio de  $0,30 \text{ mm.m}^{-1}$ .

Conforme a NBR 14806 (2002), há uma tolerância para a flecha do encurvamento em madeiras de folhosas de até  $5 \text{ mm.m}^{-1}$ , para tábuas com dimensão superior a 3 metros de comprimento. Neste estudo, foi utilizado tábuas

com 0,66 m de comprimento, o que fazendo uma analogia da tolerância para a flecha de encurvamento com a NBR 9487 (1996), seria de  $1,10 \text{ mm.m}^{-1}$ . O encurvamento que as madeiras de teca tiveram foram de  $0,30 \text{ mm.m}^{-1}$ , portanto conclui-se que todas as tábuas submetidas ao à secagem deste trabalho estão aptas ao processo de manufatura.

Brandão (1989) relatou que o encurvamento ocorre em função das diferentes retrações que ocorrem na madeira em razão da secagem mais acelerada em uma face frente à outra. A presença de lenhos anormais, assim como, tábuas favorecem o encurvamento da madeira. Simpson (1991) e Denig et al. (2000) ainda relataram que o encurvamento não é um dos defeitos mais problemáticos na madeira, visto que o mesmo pode ser eliminado realizando o correto empilhamento das madeiras nas pilhas para a secagem. Sendo que o encurvamento é influenciado mais pelo empilhamento em si do que propriamente pelo processo de secagem (KLITZKE, 2007). A utilização de cargas adicionais sobre as pilhas, assim como, a colocação das tábuas que apresentam encurvamento nas primeiras camadas de madeiras, favorecem a minimização da ocorrência deste defeito ao fim do processo de secagem (BEKELE, 1995; CINIGLIO, 1998, KLITZKE, 2007; SUSIN, 2012).

Severo (1998) estudando o gênero *Eucalyptus*, em que, avaliou três programas de secagem, constatou que o programa de secagem elaborado de forma mais suave, o defeito de encurvamento na madeira de *Eucalyptus grandis* foi presente em 10% das tábuas amostradas. Sendo que 7,5% o encurvamento foi inferior  $5 \text{ mm.m}^{-1}$  e 2,5% superior a  $5 \text{ mm.m}^{-1}$ . Já os dois programas mais severos o autor encontrou de 5 a 10% de tábuas que tiveram arqueamento superior a  $5 \text{ mm.m}^{-1}$  e .12,5 a 20% de tábuas que tiveram arqueamento inferior a  $5 \text{ mm.m}^{-1}$ . Susin (2012) encontrou para madeiras de *Corymbia citrodora* flecha de encurvamento após a secagem em câmara convencional de  $0,71 \text{ mm.m}^{-1}$ , enquanto, para madeiras de *Eucalyptus robusta* e *E. saligna* flechas de 0,85 e  $0,57 \text{ mm.m}^{-1}$ , respectivamente.

As madeiras de teca (*Tectona grandis*) não apresentaram flecha de encanoamento, de forma que caracterize a ocorrência deste defeito oriundo do processo de secagem. A NBR 14806 (2002), relata que a tolerância para a ocorrência deste defeito, é que o processo de aplainamento das tábuas não reduza sua espessura em mais de 4 mm abaixo de sua espessura nominal. Uma das justificativas para a não ocorrência deste tipo de defeito, seria a largura nominal das



tábuas utilizadas nesta pesquisa, sendo de 100 mm e pela característica da espécie estudada que apresenta baixo índice de anisotropia.

Galvão; Jankowsky (1985); Simpson (1991) relatam que o encanoamento pode ser resultante da diferença entre as retrações transversais da madeira, assim como, da exposição de apenas uma face da tábua à secagem. Susin (2012) no entanto, enfatiza que o correto empilhamento da carga, dispondo peças tangenciais nas primeiras camadas, aliado à utilização de utilização de placas de concreto, com função de restrição mecânica, a secagem lenta e uniforme e a utilização de tábuas com largura inferior a 250 mm proporcionaram a ausência desse defeito no processo de secagem. A uniformização das dimensões das tábuas reduz a probabilidade de empenamentos, como o encanoamento (BOONE et al., 1992).

#### **4.1.5.3 Colapso**

Para o colapso, as madeiras de teca, não apresentaram susceptibilidade para a manifestação deste defeito, para o programa de secagem avaliado, mesmas observações foram realizadas por Salas; Moya (2014), que também não encontraram a manifestação de tal defeito em seus estudos.

Kauman (1960) afirmou que, a contração excessiva e irregular da madeira, o qual ocasiona a formação de um colapso forte, ocorre em um número limitado de espécies, geralmente, de massa específica intermediária. Ponce (1995) e Susin (2012) relataram que madeiras de eucalipto apresentam maior tendência a colapso em espécies de média densidade e menor tendência naquelas de baixa e alta densidade.

Blumhm; Kauman (1965) citaram que a manifestação do colapso é mais forte no plano que tange os anéis de crescimento comparado ao plano perpendicular aos anéis de crescimento, e de mesmo modo, no lenho inicial, comparado ao lenho tardio. Concomitantemente, o colapso se manifesta de modo mais intenso em tábuas orientadas radialmente, se comparadas àquelas orientadas tangencialmente.

Ao detectar a manifestação deste defeito, deve-se realizar a inclusão de uma etapa de tratamento de vaporização com o intuito de recuperar o colapso, caso não tenha ocorrido o rompimento da parede celular da madeira (SUSIN, 2012). Blumhm; Kauman (1965) recomendam que essa etapa seja realizada quando a madeira se encontrar no intervalo entre 15% e 20%, preferencialmente, ao teor de umidade de

17%. Ou ainda, realizar a pré secagem ao ar livre, até atingir teor de umidade em torno de 30%, e finalizando a mesma em estufa. Esse procedimento é mais economicamente viável que os anteriores, especialmente por a madeira permanecer por um tempo inferior dentro da estufa de secagem convencional, não ocasionando perdas de material (SUSIN, 2012).

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos para a secagem da madeira de teca (*Tectona grandis*) em câmara convencional no presente estudo permitem as seguintes conclusões:

- O programa de secagem elaborado mostrou-se satisfatório para a secagem da madeira de teca para produtos que requerem matéria prima de qualidade;
- As taxas de secagem da madeira foram proporcionais ao fluxo de fluido na madeira de teca, não proporcionando rompimentos das estruturas celulares da madeira;
- O teor de umidade final da madeira, assim como, os gradientes de secagem ficaram dentro do esperado ao final do processo de secagem em câmara convencional;
- A madeira de teca, não apresentou incidência em defeitos de secagem, os quais, comprometessem a sua utilização para a manufatura em produtos sólidos de madeira.

## 6. REFERENCIAS

ANDRADE, A. **Indicação de programas de secagem convencional de madeiras**. 2000. 72f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

ANDRADE, A; JANKOWSKY, I. P.; DUCATTI, M. A. Grupamento de madeiras para secagem convencional. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 59, p. 89-99, 2001.

ARRUDA, P. M. **Secagem da madeira juvenil de *Tectona grandis* L. F.** 2013. 98f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira), Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9487**. Classificação de madeiras serrada de folhosas. Rio de Janeiro. 1986. 32p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12551**. Madeira serrada - Terminologia. Rio de Janeiro. 2002. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14806**. Madeira serrada de eucalipto - Requisitos. Rio de Janeiro. 2002. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**. Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro. 1997. 107p.

BATISTA, D. C. **Qualidade da secagem convencional conjunta da madeira de nove clones do gênero *Eucalyptus***. 2009. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

BEKELE, T. Degradation of boards of *Eucalyptus globulus* Labill. and *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. during air drying. **Holz Roh Werkst**, v. 53 n. 6, p. 407-412, 1995.

BLUMHM, E.; KAUMAN, W. G. El colapso en la madera y su reacondicionamiento. **Informe técnico nº 22**. Instituto Forestal. Santiago – Chile. 1965.

BOONE, R. S.; MILOTA, M. R.; DANIELSON, J. D.; HUBER, D. W. **Quality drying of hardwood lumber**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1992. 58 p.

BRANDÃO, A. T. O. **Determinação de metodologia para a indicação de programas de secagem de madeiras**. 1989. 100f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

BRAZ, R. L.; DUARTE, A. P. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; MOTTA, J. P.; ROSADO, A. M. Curva característica de secagem da madeira de *Tectona grandis* e *Acacia mangium* ao ar livre. **Floresta e Ambiente**, v. 22, p. 117-123, 2015.

CINIGLIO, G. **Avaliação da secagem de madeira serrada de *E. grandis* e *E. urophylla***. 1998. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

DENIG, J.; WENGERT, E. M.; SIMPSON, W. T. **Drying hardwood lumber**. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–118. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2000. 138 p.

FLORÉZ, J. B.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; HEIN, P. R. G.; SILVA, J. R. M. Caracterización de la madera joven de *Tectona grandis* L.f plantada en Brasil. **Madera y Bosques**, v. 20, p. 11-20, 2014.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 111p.

HILDEBRAND, R. **Kiln drying of sawn timber**. Germany: Maschinenbau GmbH, 1970. 199p.

JANKOWSKY, I. P. **Metodologia simplificada para a indicação de programas de secagem**. 2009. 112f. Tese (Livre docência em Ciência e Tecnologia da Madeira), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009.

KAUMAN, W. G. Contribution to the theory of cell collapse in wood, investigations with *Eucalyptus regnans*. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**. Irbid, n. 11 p. 122-145. 1960.

KLITZKE, R. J. Secagem da madeira. In: José Tarcísio da Silva Oliveira, Nilton César Fiedler, Marcelo Nogueira. (Org.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro**. Visconde do Rio Branco: Suprema Gráfica e Editora Ltda, 2007, v. 1, p. 271-366.

KLITZKE, R. J. **Uso do inversor de frequência na secagem de madeiras**. 2002. 239f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; CRUZ, C. R. Deformações residuais longitudinais decorrentes de tensões de crescimento em eucaliptos e suas associações com outras propriedades. **Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 107- 116, 2004.

LIMA, I. L. **Influência do desbaste e da adubação na qualidade da madeira serrada de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden**. 2005. 137f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

LOIOLA, P. L.; JUIZO, C. G. F.; MARCHESAN, R.; KLITZKE, R. J.; ROCHA, M. P. Drying of wood from *Mimosa scabrella*, *Eucalyptus dunnii* and *Tectona grandis* in solar kiln, in south Brazil. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 9, p. 445-453, 2015.

MALAN, F. S. *Eucalyptus* improvement for lumber production. In: Seminário internacional de utilização da madeira de eucalipto para serraria, 1995, São Paulo. **Anais...** Piracicaba, SP: IPEF/IPT, 1995. p.1-19.

MARTINS, V.A. **Secagem de madeira serrada**. Brasília: IBDF, 1988. 56p.

MELLADO, E. C. E. R. **Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de Pinus**. 2007. 155f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

MOTTA, J. P. **Propriedades tecnológicas da madeira de *Tectona grandis* L. F. proveniente do vale do rio doce, Minas Gerais**. 2011. 126f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2011.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Text book of wood technology**. 4 ed. New York: MacGraw-Hill, 1980. 722 p.

PONCE, R. H.; Madeira serrada de eucalipto: desafio e perspectivas. In: Seminário internacional de utilização da madeira de eucalipto para serraria, 1995, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IPEF, 1995. p. 50-58.

PRATT, G. H. **Timber drying manual**. London: Department of the Environment/Building Research Establishment, 1974. 152p.

SALAS, C.; MOYA, R. Kiln, solar and air drying behavior of lumber of *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* from Fast-grown plantations: moisture content, wood color, and drying defects. **Drying Technology: An International Journal**. London, v. 32, n. 3, p. 301-310. 2014.

SEVERO, E. T. D. **Efeito da temperatura e da velocidade do ar na secagem de madeira serrada de *Pinus elliottii***. 1989. 109f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

SEVERO, E. T. D. **Estudo sobre o efeito da vaporização nas propriedades e comportamento de secagem da madeira de *Eucalyptus dunnii* Maid**. 216f. 1998. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

SIAU, J. F. **Transport process in wood**. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 245 p.

SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual**. Madison: U.S. Department of Agriculture, 1991. 274 p.

SIMPSON, W. T. **Effect of air velocity on the drying rate of single eastern white pine boards**. USDA Forest Service, Research Note FPL-RN-266, 1997, 5p.

SKAAR, C. **Wood-water relation**. New York: Springer-Verlag. 1988. 283p.



SUSIN, F. **Avaliação de programas de secagem para madeiras de eucalipto elaborados com base em testes prévios a alta temperatura.** 2012. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

TOMASELLI, I. **Aspectos físicos da secagem de madeira de *Pinus elliottii* Engelm. acima de 100°C.** 1981. 128 f. Tese (Livre Docência em Engenharia e Tecnologia Rurais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1981.

VALERO, S. W.; REYES, E.C. C.; GARAY, D.A. J. Estudio delas propiedades físico mecánicas de la especie *Tectona grandis*, de 20 anos de edad, proveniente de las plantaciones de la unidad experimental de la Reserva Forestal Ticoporo, Estado Barinas. **Revista Forestal Venezolana** v. 49, n. 1, p.61-73, 2005.

WANNENG, P. X.; OZARSKA, B.; DAIAN, M. S. Physical properties of *Tectona grandis* grown in Laos. **Journal of Tropical Forest Science**, Malaysia, v. 26, n. 3, p. 389 –396, 2014.

WENGERT, E. M.; DENIG, J. Lumber drying – today and tomorrow. **Forest Products Journal**. Madison, v. 45, n. 5, p. 22 – 30, 1995.

### **CAPÍTULO 3 - SECAGEM SEVERA DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis* L. f) E AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA**

#### **RESUMO**

A taxa ou velocidade de secagem depende tanto dos fatores inerentes ao processo de secagem, (temperatura, umidade relativa, velocidade de circulação do ar e o potencial de secagem) como também, dos fatores intrínsecos à madeira (espécie, anatomia, permeabilidade e constituição química). O potencial de secagem exerce influência juntamente com a temperatura na velocidade de secagem. Este estudo teve por objetivo avaliar o comportamento da madeira de teca (*Tectona grandis*) em condições de secagem severa em câmara convencional de secagem. Foram avaliados dois potenciais de secagem (3,4 e 4,4), sendo a secagem conduzida em uma câmara convencional piloto, onde foram utilizadas 50 tábuas com dimensões de 110 x 25 x 660 mm (largura x espessura x comprimento) em cada programa avaliado. A temperatura de secagem iniciou-se a 55°C, finalizando em 80°C. Foram avaliados os parâmetros de taxa de secagem, tempo de secagem, retração da madeira e a qualidade da madeira seca. Assim como, a influência da velocidade de circulação do ar abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF), no consumo de energia elétrica pelo ventilado. O potencial de secagem exerce influência nos valores de taxa de secagem, tanto para a remoção da água capilar, como para a remoção da água de difusão. A redução da velocidade de circulação do ar abaixo do PSF, proporcionou economia nominal de energia elétrica pelo ventilador.

Palavras chave: Temperatura. Potencial de secagem. Taxa de secagem. Energia.

## ABSTRACT

The rate and velocity of wood drying depends as much of inherent factors of the drying process (temperature, relative moisture, air circulation, and drying potential) as the intrinsic factors of the wood (species, anatomy, permeability and chemical content). The drying potential and the temperature influences on the drying velocity. The objective of this study was to evaluate the behaviour of wood of *Tectona grandis* in high drying temperature in conventional kiln. Two drying potentials were evaluated (3.4 and 4.4), and the drying process been conducted in a drying chamber, where 50 boards measuring 110 x 25 x 600 mm, width x thickness x length were placed. The drying temperature began at 55°C and was finalized in 80°C. The parameters evaluated were drying rate, drying time, wood shrinkage, and the quality of the wood drying. The other parameter evaluated was the influence of air circulation, bellow the fiber saturation point (PSF), in the electric energy consumed by the fan dek. The drying potential influences the values of drying rate, as much as in the removal of capillary water and as in the removal of water by diffusion. The reduction velocity by the air circulation bellow the wood PSF, generated a decrease of nominal electric energy consumed by the fan dek.

Keywords: Temperature. Drying potential. Drying rate. Energy.

## 1. INTRODUÇÃO

A secagem severa de madeiras, só é possível com a utilização de equipamentos bem projetados e com sistema automatizado de controle, podendo o processo de remoção de água da madeira ser conduzido à temperaturas e potencial de secagem acima das condições normalmente empregada na madeira a ser seca.

Sabe-se que a temperatura na secagem de madeiras, exerce influência na taxa de secagem ou velocidade de secagem, pois, quanto maior a temperatura, maior será a taxa de evaporação de umidade da madeira e também na umidade relativa do ar no interior da estufa (SEVERO, 1989; KLITZKE, 2007). Em câmara convencional de secagem, a transferência de calor, ocorre sob duas formas, por convecção forçada (condução de calor através da camada limite) e por condução (condução de calor na madeira), sendo que a transferência de calor por condução na madeira é influenciada pelas propriedades termofísicas da madeira de condutividade térmica, calor específico e pela difusividade térmica, as quais, são afetadas pela densidade, teor de umidade, teor de extrativos, direção da grã e pelas características estruturais como: nós e ângulo microfibrilar (KOLLMANN; CÔTE JUNIOR, 1968; SIMPSON, 1991; MELLADO, 2007; INCROPERA et al., 2008).

A umidade relativa, que por definição é a relação entre a pressão parcial de vapor e a pressão de vapor saturado a uma dada temperatura, o qual determina a capacidade do ar em reter moléculas de vapor d'água (KLITZKE, 2002; ELEOTÉRIO, 2009). Quanto menor a umidade relativa do ambiente secante a uma dada temperatura, menor a umidade de equilíbrio do interior do ambiente.

A razão entre o teor de umidade da madeira e a umidade de equilíbrio do ambiente, determina-se o potencial de secagem, estando diretamente relacionado com a taxa ou velocidade de secagem. Klitzke (2007) relata que potenciais de secagem elevados, além de proporcionar altas taxas de secagem, reduzindo o ciclo de secagem, consequentemente ocasiona uma secagem excessiva das camadas superficiais da madeira, agravando as tensões de secagem, deformações nas tábuas. E podendo causar ainda o endurecimento superficial da madeira, prejudicando assim, a sua secagem.

A taxa de secagem ou velocidade de secagem refere-se à quantidade de umidade evaporada, em certo intervalo de tempo em relação à área de evaporação

da peça de madeira, podendo a taxa de secagem ser calculada em porcentagem de umidade por hora ou em quilograma de água por hora. Com essas informações obtidas pode-se estimar o tempo de secagem de uma determinada espécie da condição de madeira verde, até um teor de umidade considerado a uma dada temperatura e umidade de equilíbrio (KLITZKE; BATISTA, 2010).

A taxa de secagem, no entanto, depende tanto dos fatores inerentes ao processo de secagem, (temperatura, umidade relativa, velocidade de circulação do ar entre as pilhas de madeiras e o potencial de secagem) como também, dos fatores intrínsecos à madeira (espécie, anatomia, permeabilidade e constituição química).

Contudo, sabe-se que a temperatura reduz consideravelmente o tempo de secagem, proporcionando aumentos da taxa ou velocidade de secagem, principalmente, para a remoção da água de difusão, enquanto, a velocidade de circulação do ar, exerce influência significativa na transferência de calor à superfície da madeira, assim como, na transferência da massa de vapor d'água da superfície para o meio secante, aumentando a taxa de remoção da água capilar. A influência do potencial de secagem empregado no processo foi pouco explorada até o momento, no entanto, sabe-se que exerce influência juntamente com a temperatura e velocidade de circulação do ar na transferência de calor do meio secante para a superfície da madeira.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o comportamento da madeira de teca (*Tectona grandis*) e consumo de energia elétrica do sistema de ventilação em condições de secagem severa em câmara convencional de secagem.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar as taxas de secagem das madeiras de teca, para os potenciais de secagem empregado, assim como, para as diferentes velocidades de circulação do ar utilizadas;

Avaliar a qualidade das madeiras secas após a secagem severa, sob seus aspectos qualitativos como ocorrência de rachaduras, empenamentos colapso e gradientes de umidade;

Avaliar o consumo de energia elétrica do sistema de ventilação para a secagem das madeiras de teca (*Tectona grandis*) nos intervalos de umidade de verde até o PSF, do PSF até 10% e de verde até 10% de umidade.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 SECAGEM DRÁSTICA EM CÂMARA CONVENCIONAL

##### 3.1.1 Programa de secagem utilizado

O programa de secagem sob condições severas empregado para as madeiras de teca (*Tectona grandis*) na câmara de secagem convencional, constituiu-se de temperatura inicial de 55 °C, temperatura final de 80 °C, sendo utilizado dois potenciais de secagem, os quais foram 3,4 (Tabela 29) e 4,4 (Tabela 30), respectivamente.

TABELA 28 - PROGRAMA DE SECAGEM COM POTENCIAL DE SECAGEM DE 3,4

Umidade da madeira (%)	Temperatura (°C)		Umidade relativa (%)	Umidade equilíbrio	Tempo (horas)	Potencial secagem
	TBS	TBU				
Aquecimento	55	55	100	-	3	-
40	55	49	73	12	-	3.3
34	58	50	65	10	-	3.4
28	61	49	54	8	-	3.4
25	64	50	49	7	-	3.4
22	68	50	42	6	-	3.4
18	72	49	36	5	-	3.4
15	76	52	31	4	-	3.3
12	78	48	22	3	-	3.4
10	80	43	14	2	-	3.3
Condicionamento	80	71	69	10	8	1,0
Resfriamento	44	35	55	10	3	-

Nota: TBS: temperatura bulbo seco; TBU: temperatura bulbo úmido.

TABELA 29 - PROGRAMA DE SECAGEM COM POTENCIAL DE SECAGEM DE 4,4

Umidade da madeira (%)	Temperatura (°C)		Umidade relativa (%)	Umidade equilíbrio	Tempo (horas)	Potencial secagem
	TBS	TBU				
Aquecimento	55	55	100	-	3	-
40	55	46	60	9	-	4.4
34	58	46	52	8	-	4.4
28	61	46	44	7	-	4.3
25	64	48	41	6	-	4.3
22	68	50	39	5	-	4.3
18	72	50	30	4	-	4.4
15	76	47	21	3	-	4.3
12	78	46	17	2	-	4.4
10	80	48	15	1	-	4.4
Condicionamento	80	71	69	10	8	1,0
Resfriamento	44	35	55	10	3	-

Nota: TBS: temperatura bulbo seco; TBU: temperatura bulbo úmido.

Foi utilizado como velocidade de circulação do ar padrão para as secagens da madeira de teca (*Tectona grandis*)  $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ , sendo os tratamentos avaliados dispostos na Tabela 31.

TABELA 30 - PROGRAMAS DE SECAGEM COM ALTERAÇÕES NA VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO DO AR ABAIXO DO PSF PARA AS MADEIRAS DE TECA (*Tectona grandis*)

Programas de secagem avaliados	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Potencial Secagem	Velocidade abaixo do PSF ( $\text{m.s}^{-1}$ )
Programa 4				2,5
Programa 5	55	80	3,4	1,5
Programa 6				3,5
Programa 7				2,5
Programa 8	55	80	4,4	1,5
Programa 9				3,5



### 3.2 AVALIAÇÃO DA SECAGEM SEVERA EM CÂMARA CONVENCIONAL

As avaliações da secagem das madeiras foram realizadas de acordo com a taxa de secagem, umidade final, gradiente de umidade, presença de tensões de secagem, incidência de defeitos e retração da madeira. Estas avaliações foram realizadas após 24 horas do término da secagem, sendo a metodologia empregada a mesma apresentada no Capítulo 2, nos respectivos itens, 3.2.1 Taxa de secagem; 3.2.2 Umidade final, gradiente de umidade e tensões de secagem; 3.2.3 Incidência de defeitos e 3.3 Retração da madeira.

### 3.4 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA SECAGEM

A avaliação do consumo de energia elétrica pelo ventilador da câmara de secagem semi industrial, em cada programa de secagem avaliado, foi realizada a partir do medidor de consumo (Wh) acoplado ao controlador de frequência do equipamento.

O sistema de gerenciamento do medidor de consumo de energia, ocorre pela emissão de pulsos, em que cada pulso emitido, corresponde a 3,125 kh, quantificado os pulsos emitidos, assim, determina-se o consumo de energia elétrica pelo ventilador em Wh.

Ressalta-se que o consumo de energia elétrica pelo ventilador, foi determinada para o processo de secagem da madeira, o qual determinou-se o consumo (kWh) para a remoção em faixa de umidade (verde até PSF; PSF até 10% de umidade; verde até 10% de umidade).

### 3.5 ANÁLISE E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Para análise e avaliação dos resultados, procedeu-se análise de variância e nas situações em que a hipótese de nulidade ( $H_0$ ) foi rejeitada e quando detectada diferença estatística pelo teste F, aplicou-se o Teste de Tukey (5%) para a diferenciação das médias.

Com intuito de ilustrar a relação entre as variáveis envolvidas, procedeu-se uma análise de regressão, seleccionando o modelo que apresentou o melhor ajuste, levando-se em consideração o coeficiente de determinação e o erro padrão da estimativa.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 AVALIAÇÃO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM

#### 4.1.1 Umidade inicial, tempo de secagem e massa específica aparente das madeiras

Observa-se na (Tabela 32) os valores de umidades iniciais das madeiras de teca que compunham as cargas de secagem para cada programa de secagem. Nota-se, diferenças estatísticas ao nível de 5% de significância para as umidades das madeiras que compunham a carga do programa 6 e 8 (91,18 e 92,59%, respectivamente), para as madeiras com as madeiras que compunham as cargas dos programas 5 e 2 (76,44%), em que a diferença de umidade inicial entre os valores mais discrepantes é de 17%. As umidades médias das madeiras foram de 86,83%.

TABELA 31 - TEOR DE UMIDADE INICIAL, TEMPO E MASSA ESPECÍFICA APARENTE PARA A MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*)

Programas de secagem	Potencial de secagem	Velocidade acima PSF (m.s <sup>-1</sup> )	TUi (%)	Tempo (horas)	MEap 10% (g.cm <sup>-3</sup> )
4	3,4	2,5	86,54 ab (28,45; 32,87)	56,67	0,55 a (0,05; 8,57)
5		1,5	76,44 a (33,40; 43,70)	79,50	0,56 a (0,05; 8,88)
6		3,5	91,18 b (24,41; 26,77)	46,67	0,54 a (0,05; 9,36)
7	4,4	2,5	87,33 ab (24,81; 28,41)	51,33	0,54 a (0,06; 10,28)
8		1,5	92,59 b (28,62; 30,91)	57,50	0,55 a (0,05; 8,73)
9		3,5	85,76 ab (25,66; 29,93)	46,25	0,53 a (0,05; 10,20)
Média	-	-	86,83 (27,35; 31,49)	-	0,54 (0,05; 9,42)
F	-	-	3,80**	-	1,90**

Nota: PSF: ponto saturação das fibras; TUi: teor de umidade inicial; MEap: massa específica aparente. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão e coeficiente de variação (%) respectivamente. Médias seguidas pela mesma letra minúscula (vertical) não diferem estatisticamente entre si (Tukey,  $p \geq 0,05$ ).

Apesar das diferenças das umidades iniciais das madeiras pertencentes às cargas, a condução do programa de secagem tem-se a fase de aquecimento que teve um período de 3 horas, com 100% de umidade relativa, com o intuito de promover não somente o aquecimento das madeiras, mas também, tornar-se homogêneo as umidades iniciais das madeiras de teca pertencentes à carga.

As umidades iniciais, referem-se às umidades que as madeiras compunham a carga, e para a secagem das madeiras estas umidades foram elevadas pela fase de aquecimento as tornando homogêneas, assim, não afetando nos valores de taxa de secagem.

Nota-se (Figura 30) a caixa box-plot para as umidades iniciais das madeiras, em que fica evidenciado que as umidades iniciais possuem os desvios padrões homogêneos, assim como, as meridianas semelhantes, não havendo discrepâncias entre as umidades. Para que se obtenha uma secagem de forma uniforme entre as madeiras que compõe a carga, é importante que as umidades iniciais das madeiras, estejam semelhantes entre si.

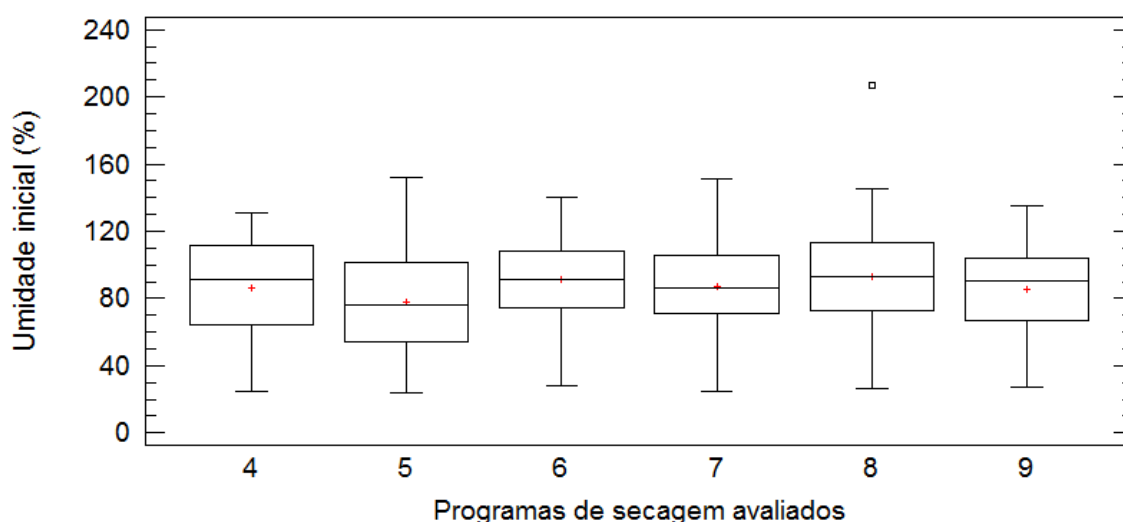


FIGURA 28 - Variação do teor de umidade inicial das madeiras de teca (*Tectona grandis*) submetida à secagem em câmara convencional de secagem

As umidades iniciais média das madeiras do presente estudo (86,83%), condizem com as umidades iniciais das madeiras secas discutidas no Capítulo 2 (82,46%), assim como, corroboram com a umidade inicial apresentados na literatura

para a espécie em estudos realizados por Arruda (2014); Loiola et al. (2015) e Salas; Moya (2014).

Valores de umidades iniciais de madeiras, são influenciados pelo tempo de abate das árvores, permanência das toras para o desdobro e consequentemente, pelo tempo de preparo das amostras para as aferições de umidades. Brand; Muniz (2010) ainda relataram a influência da estação do ano para a colheita sobre o teor de umidade das madeiras.

Para os tempos de secagem para as madeiras de teca (Tabela 32, Figura 31), observa-se para as madeiras que foram secas utilizando potencial de secagem em 3,4. A menor velocidade de circulação do ar abaixo do PSF empregada ( $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ ) obteve os maiores tempos de secagem (79,50 horas), enquanto às demais velocidades de circulação do ar entre as pilhas de madeira ( $2,5$  e  $3,5 \text{ m.s}^{-1}$ ), a secagem das madeiras de teca, tiveram um ciclo de 56,57 e 46,67 (horas), respectivamente.

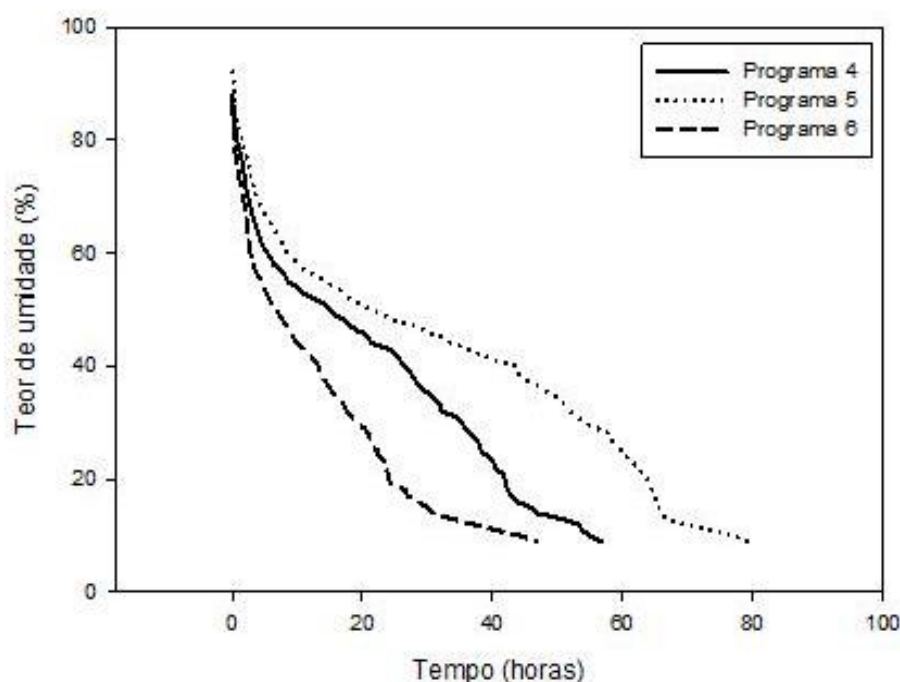


FIGURA 29 - Tempo de secagem da madeira de teca (*Tectona grandis*) para os programas com potencial de secagem de 3,4

Analisando o ciclo de secagem dos programas elaborados com potencial de secagem em 4,4, nota-se (Tabela 32 e Figura 32) que a menor velocidade de circulação do ar entre as pilhas de madeira abaixo do PSF ( $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ ), teve o maior

tempo de secagem (57,50 horas), enquanto as velocidades de 2,5 e 3,5 m.s<sup>-1</sup>, as madeiras tiveram tempos de secagem de 51,33 e 46,25 horas, respectivamente.

Diante dos resultados obtidos, a velocidade de circulação do ar abaixo do PSF das madeiras, seguem uma tendência explícita para a redução ou aumento do tempo de secagem. É notório que a velocidade de circulação do ar abaixo do PSF, está diretamente relacionada à velocidade de remoção de vapor d'água da superfície da madeira, conseqüentemente, influenciando na formação do gradiente de umidade entre as camadas superficiais contíguas da madeira.

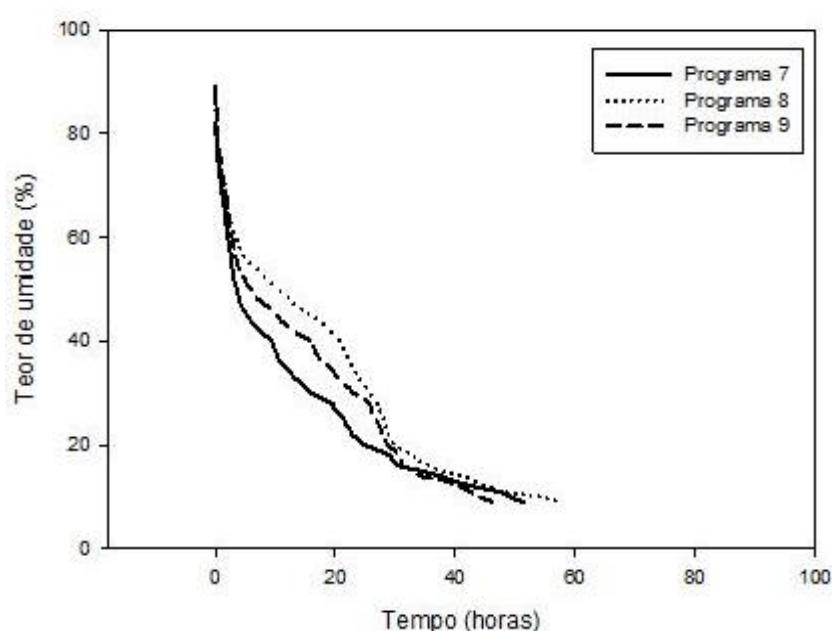


FIGURA 30 - Tempo de secagem da madeira de teca (*Tectona grandis*) para os programas com potencial de secagem de 4,4

A temperatura de secagem, assim como, potencial de secagem, são fatores inerentes ao ambiente de secagem, que proporcionam reduções consideráveis do ciclo de secagem, visto os resultados obtidos e discutidos no Capítulo 2, em que foi mantido o potencial de secagem, no entanto, foi realizado alterações nas velocidades de circulação do ar abaixo do PSF das madeiras.

A massa específica aparente a 10% de umidade das madeiras de teca (*Tectona grandis*) provenientes das tábuas secas nos diferentes programas de secagem avaliados, observa-se (Tabela 32, Figura 33) que as madeiras tiveram como média geral de 0,54 (g.cm<sup>-3</sup>), não sendo constatado diferença estatística ao nível de 5% de probabilidade para nenhum dos programas avaliados.

As massas específicas aparentes das madeiras foram 0,55; 0,56; 0,54; 0,54 0,55 e 0,53 0,52 ( $\text{g.cm}^{-3}$ ), respectivamente para as cargas secas pelos programas 4; 5; 6; 7; 8 e 9. Outro fato a ser observado é que as massas específicas das tábuas secas, seguem a mesma tendência das massas específicas aparente a 12% de umidades, das amostras confeccionadas conforme preconizada as normas da COPANT (1972), que tiveram valores de  $0,56 \text{ g.cm}^{-3}$ .

A massa específica da madeira pode ser considerada como resultante da interação das propriedades anatômicas e química da madeira. Panshin; De Zeeuw (1980) ainda complementam que as variações da densidade são provenientes das diferenças nas dimensões celulares e pela quantidade de extrativos presentes por unidade de volume na madeira. A massa específica da madeira, afeta de forma significativa a secagem das madeiras, sendo que, madeiras que possuem elevadas massas específicas, são madeiras menos permeáveis, pelo fato de possuírem maior quantidade de material lenhoso por unidade de volume.

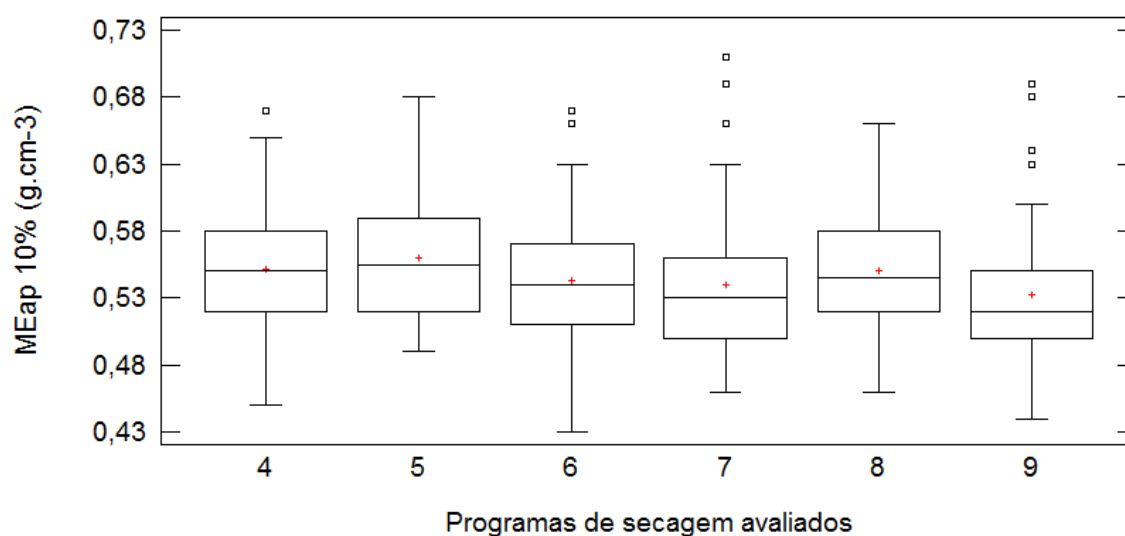


FIGURA 31 - Massa específica aparente a 10% da madeira de teca (*Tectona grandis*) das tábuas secas em câmara convencional de secagem.

Nota: MEap: massa específica aparente.

#### 4.1.2 Taxa de secagem

Observa-se (Tabela 33), para a taxa de secagem da água capilar das madeiras de teca a influência do potencial de secagem na taxa de secagem, em que, as madeiras secas pelos programas 4; 5 e 6, diferem estatisticamente das madeiras secas pelos programas 7; 8 e 9, tendo o valor médio de taxa de secagem para os programas com potencial de secagem de 3,4 de 5,4936 %U.h<sup>-1</sup> e para as madeiras secas pelos programas com potencial de 4,4 a taxa de secagem média foi de 8,8177 %U.h<sup>-1</sup>.

TABELA 32 - TAXA SECAGEM DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*) ENTRE OS PROGRAMAS DE SECAGEM AVALIADOS EM FUNÇÃO DO TIPO DE REMOÇÃO DE ÁGUA

Programa de secagem avaliado	Água capilar (verde a 28% de umidade)		F
	Potencial de secagem	Taxa secagem (%U.h <sup>-1</sup> )	
Programa 4	3,4	5,3342 a	761,35**
Programa 5		4,5778 a	
Programa 6		6,5787 ab	
Programa 7	4,4	9,3718 c	
Programa 8		7,4898 bc	
Programa 9		9,5916 c	
Potencial de secagem	Água higroscópica (28% a 10% de umidade)		
	Velocidade circulação ar (m.s <sup>-1</sup> )		
	2,5	1,5	3,5
3,4	1,5822 Bb	1,1229 Cc	2,5293 Aa
4,4	2,2517 Aa	1,9637 Bb	2,2357 Aa
F (Potencial de secagem x velocidade)		34,35**	
Programa de secagem avaliado	Água capilar e higroscópica (verde a 10% de umidade)		
	Potencial de secagem	Taxa secagem (%U.h <sup>-1</sup> )	F
Programa 4	3,4	4,3493 ab	664,52**
Programa 5		3,7801 a	
Programa 6		5,2835 abc	
Programa 7	4,4	7,2048 c	
Programa 8		5,9425 cb	
Programa 9		7,4755 c	

Nota: Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na horizontal, ou minúscula na vertical, dentro de cada fator, não diferem entre si (Tukey, p > 0,05).



O potencial de secagem, proporciona às madeiras, maiores velocidades de secagem, no Capítulo 2, as madeiras foram secas com potencial de secagem de 2,4, sendo a taxa de secagem média para a remoção da água capilar de 2,8237 %U.h<sup>-1</sup>.

As análises para a velocidade de secagem da água capilar, foram realizadas em um delineamento inteiramente casualizado, pelo fato de não ter ocorrido alterações do ambiente de secagem, para as madeiras de teca com teor de umidade acima do PSF.

Analisando as madeiras secas pelos programas com potenciais de secagem de 3,4 (programas 4; 5 e 6), observa-se que as taxas de secagem não diferiram-se estatisticamente entre si, tendo as velocidades de secagem de 5,3242; 4,5778 e 6,5787 %U.h<sup>-1</sup>, respectivamente. As madeiras secas, pelos programas cujo potencial de secagem foi mais severo (4,4), também não foi constatado diferenças estatísticas entre às cargas pertencentes aos programas 7; 8 e 9 (9,3718; 7,4838 e 9,5916 %U.h<sup>-1</sup>), respectivamente. No entanto, nota-se diferenças estatísticas entre os potenciais de secagem avaliados, com exceção dos programas 6 e 8 que foram estatisticamente iguais.

Apesar das taxas de secagem não diferirem-se estatisticamente, dentro de cada potencial de secagem avaliado, as diferenças entre as taxas de secagem, pode estar ligado às características das madeiras em que compunham as cargas de secagem, apesar da aleatoriedade para a seleção das tábuas, os fatores anatômicos e quanto à permeabilidade não há a possibilidade de controle destas variáveis.

Para as análises de taxas de secagem para a remoção da água higroscópica da madeira de teca (28% até 10% de umidade), foi realizado um delineamento inteiramente casualizado, porém, em arranjo fatorial (Tabela 33). Foi constatado que para o potencial de 3,4, as alterações nas velocidades de circulação de ar entre as pilhas de madeiras, abaixo do PSF, proporcionaram variações nos valores das taxas de secagem (1,5822; 1,1229 e 2,2850 %U.h<sup>-1</sup>), respectivamente para as velocidades de 2,5; 1,5 e 3,5 (m.s<sup>-1</sup>), sendo, estatisticamente diferentes entre si ao nível de 95% de confiabilidade pelo teste de Tukey.

A redução da velocidade de circulação do ar abaixo do PSF em 40%, resultou também na redução da velocidade de remoção da água higroscópica em 29%, assim como, o aumento da velocidade de circulação do ar abaixo do PSF em 40%,

as madeiras de teca tiveram um aumento da velocidade de remoção da água higroscópica em 59%.

A literatura, relata que a velocidade de circulação do ar, não exerce influência sobre a taxa de secagem da madeira abaixo do PSF, em função, de como ocorre a translocação de fluidos da água higroscópica na madeira, o qual se dá pelo fenômeno físico de difusão, sendo a temperatura um fator que influencia no mecanismo de translocação de fluidos para esta faixa de umidade (KOLLMANN; SHENEIDER, 1961; TOMASELLI, 1977; SEVERO, 1989; WENGERT; DENIG, 1995; KLITZKE, 2002).

Este aumento verificado nos valores de taxa de secagem em função das alterações nas velocidades de circulação do ar (1,5; 2,5 e 3,5 m.s<sup>-1</sup>) se justifica pelo fato que, o aumento da velocidade de remoção de vapor d'água da superfície da madeira, conseqüentemente, proporciona a formação de maiores gradientes de umidade entre as regiões contíguas da peça. O gradiente de umidade está diretamente relacionado com o fluxo molecular de massa em um estado constante no espaço e no tempo (SIAU, 1984).

Para as madeiras secas pelos programas de secagem, cujo potencial de secagem foi de 4,4, nota-se que a velocidade de circulação de ar entre as pilhas de madeira, exerce menos influencia em comparado ao ambiente de secagem menos severo (potencial de secagem de 3,4). Em função da heterogeneidade da madeira, por ser um material de origem biológica, não foi constato a tendência de aumento da velocidade de circulação do ar com o aumento dos valores de taxa de secagem, tendo os resultados corroborando com a literatura. No entanto, a alteração da velocidade de circulação do ar para 3,5 m.s<sup>-1</sup>, nota-se valores para a taxa de secagem (2,2357 %U.h<sup>-1</sup>). Enquanto às velocidades de circulação do ar de 2,5 e 1,5 m.s<sup>-1</sup>, tiveram taxas de 2,2517 e 1,9637 %U.h<sup>-1</sup>, respectivamente.

Quanto mais drástico for o ambiente de secagem, menor a influência da velocidade de circulação do ar abaixo do PSF, na taxa de secagem da madeira, sendo a temperatura a variável que exerce influência na taxa de secagem da água higroscópica de forma mais proeminente. A redução da velocidade de circulação do ar abaixo do PSF em 40%, resultou na redução da velocidade de remoção da água higroscópica em apenas 12%, enquanto, o aumento da velocidade de circulação do ar abaixo do PSF em 40%, não proporcionou alterações da velocidade de secagem.

Tomaselli (1974) relatou em seus estudos o fenômeno de “difusão impedida”, sendo sua elucidação, pelo fato das aberturas minúsculas das membranas das pontoações, cujo diâmetro é menor do que o "caminho livre médio" das moléculas de gás (vapor de água) para que ocorra o fluxo sem turbulência. Neste caso, as moléculas que entram na abertura da membrana da pontoação, com qualquer ângulo de inclinação, chocam-se com a parede lateral do capilar, sendo adsorvida temporariamente nessas paredes. Uma vez adsorvidas, estão sujeitas a mais colisões, tanto com a parede como com outras células.

É evidente que a probabilidade das moléculas avançarem nestas condições é baixa, em comparação com a difusão através de capilares de diâmetros maiores que o "caminho livre médio", a exemplo das cavidades das fibras. Em função, da complexidade do mecanismo de fluidos da madeira sob forças de difusão, as elucidações para as divergências encontradas nas taxas de secagem em função da velocidade de circulação do ar abaixo do PSF, não ficam muito esclarecidas.

Avaliando a influência do potencial de secagem nas taxas de secagem em cada velocidade de circulação do ar empregada abaixo do PSF, nota-se diferenças estatísticas para as menores velocidades de circulação do ar ( $1,5$  e  $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ ). Para a velocidade de circulação do ar de  $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ , as taxas de secagem foram de  $1,5822$  e  $2,2517 \text{ \%U.h}^{-1}$ , respectivamente para os potenciais de secagem de  $3,4$  e  $4,4$ . Para a velocidade de circulação do ar de  $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ , as taxas de secagem foram de  $1,1210$  e  $1,9637 \text{ \%U.h}^{-1}$ , respectivamente para os potenciais de secagem de  $3,4$  e  $4,4$ . Enquanto a velocidade de circulação do ar de  $3,5 \text{ m.s}^{-1}$ , as taxas de secagem foram de  $2,2850$  e  $2,2517 \text{ \%U.h}^{-1}$ , respectivamente para os potenciais de secagem de  $3,4$  e  $4,4$ , não havendo diferença estatística entre si.

As análises para a velocidade de secagem das madeiras para a condição verde até 10% de umidade foram realizadas em um delineamento inteiramente casualizado (Tabela 33), pelo fato dos maiores valores de taxa de secagem serem oriundos da primeira fase da secagem.

Analisando as madeiras secas pelos programas com potenciais de secagem de  $3,4$  (programas 4; 5 e 6), observa-se que as taxas de secagem não diferiram-se estatisticamente entre si, tendo as velocidades de secagem de  $4,3493$ ;  $3,7801$  e  $5,2535 \text{ \%U.h}^{-1}$ , respectivamente.

As madeiras secas, pelos programas às madeiras secas pelos programas cujo potencial de secagem foi de  $4,4$ , também não foi constatado diferenças

estatísticas entre às cargas pertencentes aos programas 7; 8 e 9 (7,5048; 5,9425; e 7,4755 %U.h<sup>-1</sup>), respectivamente. No entanto, as madeiras secas pelos programas 4; 6 e 7 os valores de taxa de secagem não diferem-se entre si estatisticamente, assim como, os valores de taxa de secagem das madeiras de teca secas pelos programas 6; 7; 8 e 9, também não apresentaram diferenças estatísticas.

Observa-se que o potencial de secagem, exerce influência nas taxas de secagem das madeiras de teca, sendo que, para o potencial de 3,4, as madeiras tiveram taxas de secagem de 4,4710 %U.h<sup>-1</sup>, enquanto, os valores de taxa de secagem para as madeiras secas pelos programas, cujo potencial de secagem de 4,4 foi de 6,8743 %U.h<sup>-1</sup>.

As madeiras secas pelos programas elaborado conforme metodologia apresentada por Ciniglio (1998) e Jankowsky (2009), discutido no Capítulo 2, cujo potencial de secagem foi de 2,4, as madeiras de teca tiveram taxas de secagem de 2,8237 %U.h<sup>-1</sup> (Figura 34).

A Figura 34 evidencia a influência do potencial de secagem na velocidade de secagem da madeira de teca, onde esta variável ambiental (controlada pelo processo) deve ser levada em consideração para o processo de secagem, juntamente com a temperatura de secagem utilizada para que se obtenha ao final do processo madeira que atenda às necessidades do processo de manufatura do produto final.

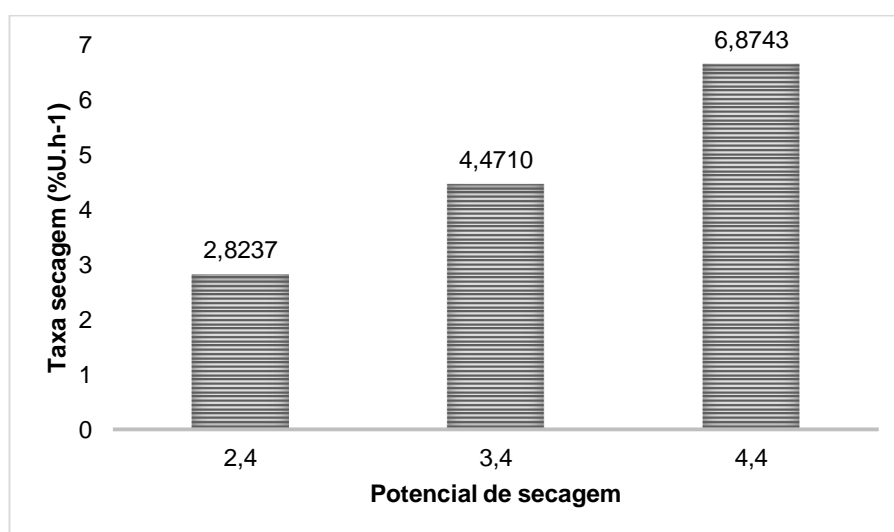


FIGURA 32 - Taxa de secagem das madeiras de teca (*Tectona grandis*) em função dos potenciais de secagem empregados

Na Figura 35 é demonstrado a tendência da taxa de secagem para as madeiras de teca (*Tectona grandis*) para cada tipo de água removida (capilar; capilar e higroscópica e higroscópica), para a secagem em câmara convencional, tendo potencial de secagem de 3,4.

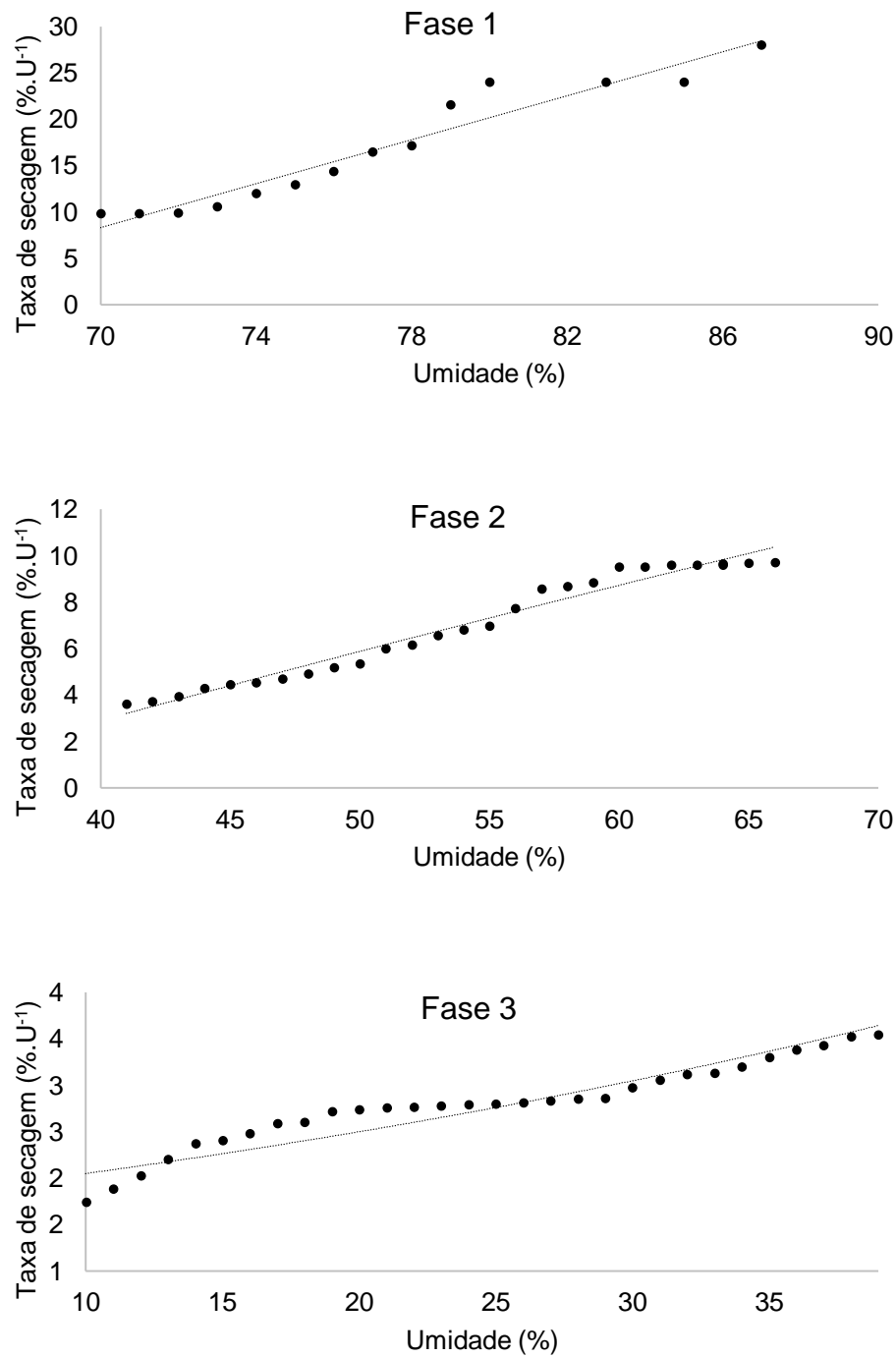


FIGURA 33 - Tendência da taxa de secagem da madeira de teca (*Tectona grandis*) em função da umidade, para a secagem drástica da madeira em câmara convencional, tendo o potencial de secagem de 3,4

Nota-se que a primeira fase da secagem (fase linear), ocorreu com valores de taxa de secagem elevados, em função da umidade inicial das madeiras e do curto período de tempo decorrido, independente dos programas avaliados (programa 4; 5 e 6). Nesta fase linear tais programas não diferem se entre si e em todos os programas as madeiras de teca, cessão esta cinética com umidades das madeiras próximas à 70%.

Na fase parabólica (fase 2), onde ocorre o aumento do gradiente de umidade entre as regiões contíguas da madeira, observa-se o decréscimo da taxa de secagem à medida que a umidade da madeira vai se aproximando do PSF, encerrando-se com umidade das madeiras próximas à 40%. Enquanto, a fase exponencial (fase 3), ocorre a remoção da maior quantidade de umidade impregnada nas paredes celulares da madeira, onde fica evidente que para o potencial de secagem em 3,4, as alterações das velocidades de circulação do ar abaixo do PSF nas madeiras de teca, ocorrem modificações nas taxas de secagem, sendo estas alterações da velocidade de secagem pouco pronunciada, conforme elucidações pronunciadas por Siau (1984); Simpson (1991) e Klitzke (2002).

Observa-se que os modelos ajustados para a taxa de secagem das madeiras de teca (Tabela 34), seguem a tendência da cinética da secagem como descrito por Siau (1984); Galvão; Jankowsky (1985); Simpson (1991); Klitzke (2007); Mellado (2007). Em que na primeira fase da secagem, onde a taxa de secagem ocorre de forma linearmente ( $Y = a + b \cdot X$ ), os coeficientes de determinação ajustados são acima de 84% para todos os programas de secagem avaliados, tendo como o maior erro padrão da estimativa de 1,70%.

Para a segunda fase da secagem, tendo a taxa de secagem tendência parabólica, o modelo de regressão que melhor se ajusta à espécie estudada, foi de  $Y = 1/(a + b \cdot X^2)$ , sendo o coeficiente de determinação para os programas de secagem avaliados, acima de 86%, com o maior erro padrão da estimativa de 0,08%. As umidades das madeiras se aproximam do PSF, inicia-se a taxa de secagem segue uma tendência exponencial [ $Y = \exp(a + b \cdot X)$ ], tendo os modelos ajustados correspondendo de forma satisfatória a tendência da taxa de secagem, com coeficientes de determinação acima de 83% e erro padrão da estimativa de 0,07%.

TABELA 33 - MODELOS MATEMÁTICOS AJUSTADOS EM FUNÇÃO DA CINÉTICA DA SECAGEM DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*) PARA OS PROGRAMAS AVALIADOS COM POTENCIAL DE SECAGEM DE 3,4

Programas secagem avaliados	Cinética da secagem	Modelos ajustados	$R_{aj}^2$ (%)	$S_{yx}$ (%)	F
Programa 4	Fase 1	$T_s = -23,1801 + 0,411482 * \text{Umidade}$	84,04	0,74	69,45**
	Fase 2	$T_s = 1/(0,711898 - 0,000127208 * \text{Umidade}^2)$	89,92	0,05	304,35**
	Fase 3	$T_s = \exp(0,322124 + 0,00693994 * \text{Umidade})$	83,78	0,03	155,93**
Programas secagem avaliados	Cinética da secagem	Modelos ajustados	$R_{aj}^2$ (%)	$S_{yx}$ (%)	F
Programa 5	Fase 1	$T_s = -43,2865 + 0,634068 * \text{Umidade}$	90,76	0,81	99,25**
	Fase 2	$T_s = 1/(0,926781 - 0,000154501 * \text{Umidade}^2)$	86,36	0,08	235,16**
	Fase 3	$T_s = \exp(0,0479607 + 0,00342169 * \text{Umidade})$	89,64	0,01	234,68**
Programas secagem avaliados	Cinética da secagem	Modelos ajustados	$R_{aj}^2$ (%)	$S_{yx}$ (%)	F
Programa 6	Fase 1	$T_s = -74,5233 + 1,18347 * \text{Umidade}$	92,85	1,70	169,89**
	Fase 2	$T_s = 1/(0,362177 - 0,0000675978 * \text{Umidade}^2)$	90,84	0,02	268,67**
	Fase 3	$T_s = \exp(0,519221 + 0,0198398 * \text{Umidade})$	86,85	0,07	199,06**

Nota:  $T_s$ : taxa de secagem (%U.h<sup>-1</sup>); exp: exponencial;  $R_{aj}^2$ : coeficiente de determinação ajustado.

$S_{yx}$ : erro padrão da estimativa. F: fator de significância.

Nas Figuras 36 é demonstrado a tendência da taxa de secagem para as madeiras de teca (*Tectona grandis*) para cada tipo de água removida (capilar; capilar e higroscópica e higroscópica), para a secagem drástica em câmara convencional, tendo o potencial de secagem de 4,4.

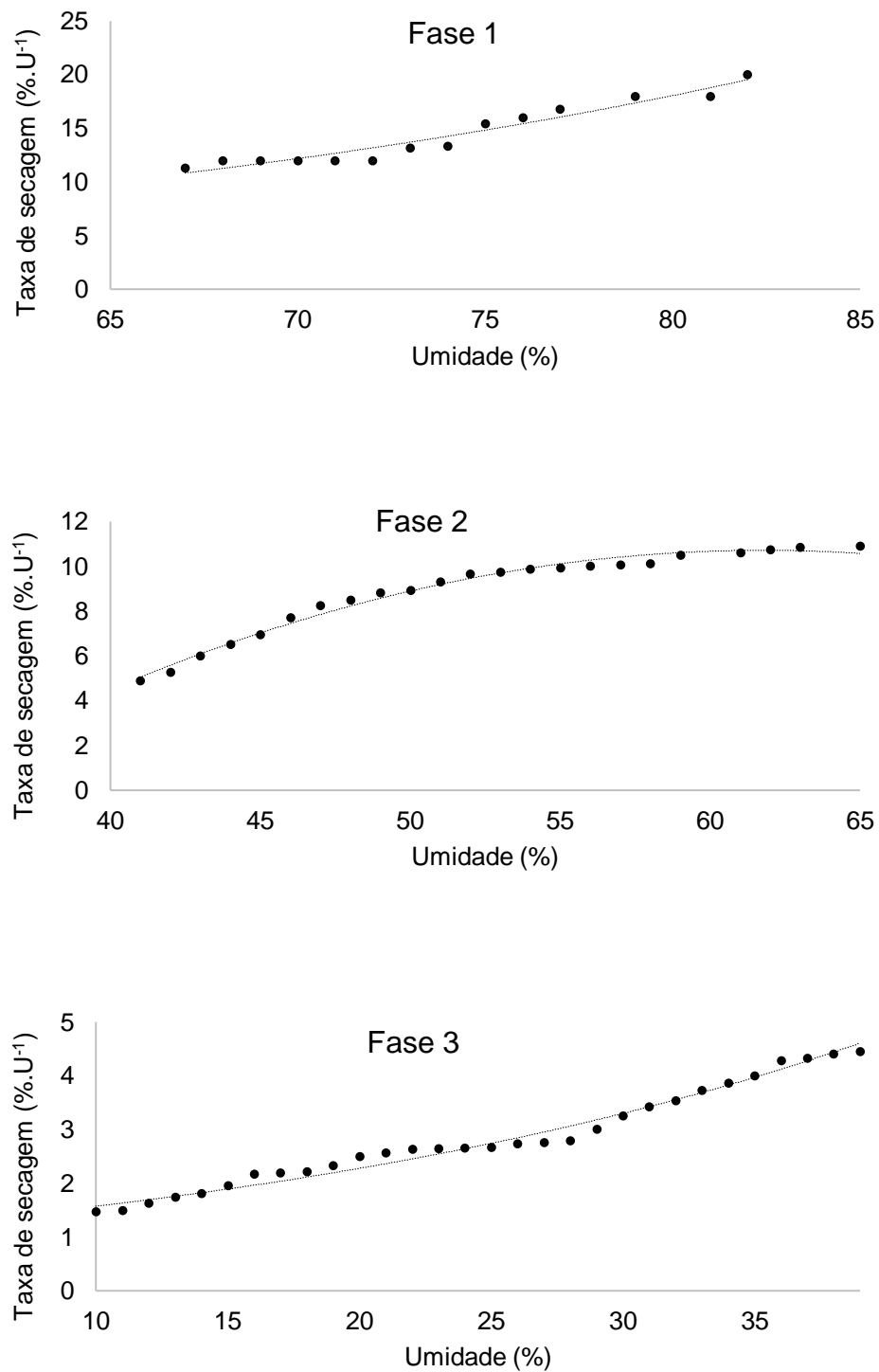


FIGURA 34 - Tendência da taxa de secagem da madeira de teca (*Tectona grandis*) em função da umidade para a secagem drástica em câmara convencional, tendo potencial de secagem de 4,4



Na fase linear da secagem (primeira fase), os valores da taxa de secagem são elevados, iniciando-se acima de  $25 \% \cdot U^{-1}$ , nos primeiros momentos da secagem da madeira, em que a umidade se encontra próximo a 90% de umidade, sendo que esta fase encerra com taxa de secagem próxima a  $10 \% \cdot U^{-1}$ . Independente da severidade do ambiente de secagem, a fase linear ocorre nos momentos iniciais da secagem, à medida que aumenta o gradiente de umidade entre as regiões contíguas da madeira, a remoção de água de forma linear vai perdendo importância. Observa-se (Tabela 35) que o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para esta fase em todos os programas (7; 8 e 9) foram acima de 90%, com erro padrão da estimativa baixos (0,88; 1,58 e 0,82%), respectivamente para os programas 7; 8 e 9.

Para a segunda fase da secagem (fase parabólica) observa-se a redução dos valores da taxa de secagem à medida que a madeira aproxima-se do PSF, sendo os modelos ajustados correspondendo de forma satisfatória o comportamento da taxa de secagem à medida que a madeira reduz o conteúdo de umidade, em que fica explícito a linha de tendência com o comportamento da taxa de secagem observada. Os coeficientes de determinação para os modelos são acima de 90%, com exceção da curva gerada para o programa de secagem 9, em que obteve-se o coeficiente de determinação ajustado de 65,54%, no entanto, o erro padrão da estimativa de 0,02%.

Já para a terceira fase da secagem (taxa de secagem exponencial), em que, para esta remoção de água nas madeiras de teca houve alterações da velocidade de circulação do ar, observa-se que para a velocidade de circulação do ar constante em  $2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (programa 7). O modelo ajustado, teve o coeficiente de determinação ajustado inferior em comparação com os modelos ajustados para a taxa de secagem em que houve modificações da velocidade de circulação do ar ( $1,5$  e  $3,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), respectivamente para os programas 8 e 9. Sendo que, para os programas 8 e 9, os coeficientes de determinação ajustados foram de 89,08 e 97,55%, respectivamente. Nota-se que independente da velocidade de circulação do ar utilizada abaixo do PSF das madeiras, os valores de taxa de secagem são semelhantes ao final do processo de secagem das madeiras de teca.

TABELA 34 - MODELOS MATEMÁTICOS AJUSTADOS EM FUNÇÃO DA CINÉTICA DA SECAGEM DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*) PARA OS PROGRAMAS AVALIADOS COM POTENCIAL DE SECAGEM DE 4,4

Programas secagem avaliados	Cinética da secagem	Modelos ajustados	$R_{aj}^2$ (%)	$S_{yx}$ (%)	F
Programa 7	Fase 1	$T_s = -32,62 + 0,625831 * \text{Umidade}$	94,61	0,88	281,73**
	Fase 2	$T_s = 1/(0,675146 - 0,00014901 * \text{Umidade}^2)$	95,80	0,03	593,52**
	Fase 3	$T_s = \exp(0,403266 + 0,0126629 * \text{Umidade})$	63,59	0,09	53,40**
Programas secagem avaliados	Cinética da secagem	Modelos ajustados	$R_{aj}^2$ (%)	$S_{yx}$ (%)	F
Programa 8	Fase 1	$T_s = -43,3915 + 0,786005 * \text{Umidade}$	91,91	1,58	182,68**
	Fase 2	$T_s = 1/(0,403248 - 0,000087739 * \text{Umidade}^2)$	83,27	0,03	120,49**
	Fase 3	$T_s = \exp(0,498718 + 0,0157322 * \text{Umidade})$	89,08	0,05	245,70**
Programas secagem avaliados	Cinética da secagem	Modelos ajustados	$R_{aj}^2$ (%)	$S_{yx}$ (%)	F
Programa 9	Fase 1	$T_s = -28,7187 + 0,584253 * \text{Umidade}$	91,86	0,82	147,70**
	Fase 2	$T_s = 1/(0,232822 - 0,0000401948 * \text{Umidade}^2)$	65,54	0,02	44,75**
	Fase 3	$T_s = \exp(0,0816706 + 0,037079 * \text{Umidade})$	97,55	0,05	1193,71**

Nota:  $T_s$ : taxa de secagem (%U.h<sup>-1</sup>); exp: exponencial;  $R_{aj}^2$ : coeficiente de determinação ajustado.

$S_{yx}$ : erro padrão da estimativa. F: fator de significância.

#### 4.1.3 Retração da madeira de teca (*Tectona grandis*)

Na retração das madeiras (Tabela 36), observou-se que as madeiras secas pelos programas de secagem, os quais foram utilizados potenciais de secagem de 3,4, as madeiras de teca tiveram retrações em largura de 2,19; 2,38 e 2,54%, respectivamente, para as madeiras secas pelos programas 4; 5 e 6. Enquanto, às madeiras secas pelos programas elaborados com potencial de secagem de 4,4, tiveram retrações em largura de 2,60; 2,24 e 2,56%, respectivamente, para os programas 7; 8 e 9. De uma forma geral, as madeiras de teca, tiveram retrações em largura de 2,27%, sendo superior aos valores encontrados para as madeiras secas pelos programas de secagem com potencial de secagem de 2,4 (Capítulo 2) de 1,98%.

Para a retração em espessuras das tábuas, nota-se que as madeiras secas pelos programas de secagem, os quais foram utilizados potenciais de secagem de 3,4, as madeiras de teca tiveram retrações em largura de 1,64; 1,43 e 1,87%,

respectivamente, para as madeiras secas pelos programas 4; 5 e 6. Enquanto, às madeiras secas pelos programas elaborados com potencial de secagem de 4,4, tiveram retrações em largura de 1,83; 1,63 e 1,99%, respectivamente, para os programas 7; 8 e 9.

TABELA 35 - RETRAÇÃO DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*) EM LARGURA, ESPESSURA, COMPRIMENTO E VOLUMÉTRICO EM FUNÇÃO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM AVALIADOS

Programas de secagem avaliados	Retração da madeira (%)			
	Largura	Espessura	Comprimento	Volumétrico
Programa 4	2,19 (0,69) (31,29)	1,64 (0,56) (34,43)	0,16 (0,12) (77,19)	3,93 (1,07) (27,18)
Programa 5	2,38 (0,38) (31,87)	1,43 (0,45) (31,81)	0,18 (0,11) (58,28)	3,95 (0,99) (25,03)
Programa 6	2,54 (0,57) (22,51)	1,87 (0,66) (35,53)	0,13 (0,06) (47,04)	4,32 (1,01) (23,45)
Programa 7	2,60 (0,51) (19,56)	1,83 (1,00) (55,05)	0,15 (0,05) (34,99)	4,53 (1,17) (25,88)
Programa 8	2,24 (0,47) (20,86)	1,63 (0,63) (38,43)	0,14 (0,04) (29,46)	3,83 (0,90) (23,43)
Programa 9	2,56 (0,60) (23,45)	1,99 (0,81) (40,40)	0,17 (0,10) (58,47)	4,56 (1,27) (27,92)
Média	2,27 (0,62) (24,40)	1,60 (0,69) (43,08)	0,14 (0,09) (28,47)	3,91 (1,11) (28,47)

Nota: Médias seguidas pela mesma letra minúscula (vertical) não diferem estatisticamente entre si (Tukey,  $p \geq 0,05$ ). Valores entre parêntesis correspondem ao desvio padrão e coeficiente de variação (%), respectivamente.

Para a retração no comprimento das tábuas, observou-se que as madeiras secas pelos programas de secagem, os quais foram utilizados potenciais de secagem de 3,4, as madeiras de teca tiveram retrações em largura de 0,16; 0,18 e 0,13%, respectivamente, para as madeiras secas pelos programas 4; 5 e 6. No entanto, às madeiras secas pelos programas elaborados com potencial de secagem de 4,4, tiveram retrações em largura de 0,15; 0,14 e 0,17%, respectivamente, para os programas 7; 8 e 9.

Avaliando a retração volumétrica proporcionada pela secagem nas tábuas, nota-se retrações de 3,93; 3,95 e 4,32%, para as madeiras secas pelos programas de secagem 4; 5 e 6, os quais, tinham como potencial de secagem 3,4. Concomitantemente, a retração volumétrica para as madeiras de teca, as quais,

foram secas pelos programas 4; 5 e 6 (potencial de secagem de 4,4), tiveram retrações de 4,53; 3,83 e 4,56, respectivamente.

Afim de verificar se o ambiente de secagem em que as madeiras de teca foram submetidas (potencial de secagem de 3,4 e 4,4) afetam o comportamento das aproximações das micelas celulares, foi realizado uma análise de variância, e detectado significância entre as médias, procedeu-se análises de teste de média (Tabela 37).

TABELA 36 - RETRAÇÃO DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*) EM LARGURA, ESPESSURA, COMPRIMENTO E VOLUMÉTRICO EM FUNÇÃO DOS POTENCIAIS DE SECAGEM EMPREGADOS

Potencial de secagem	Retração da madeira (%)			
	Largura	Espessura	Comprimento	Volumétrico
3,4	2,37 a	1,64 a	0,15	4,07 a
4,4	2,47 a	1,82 b	0,16	4,31 a
Média	2,42	1,73	0,16	4,19
F	1,76**	4,27**	0,09 <sup>ns</sup>	3,50**

Nota: Médias seguidas pela mesma letra minúscula (vertical) não diferem estatisticamente entre si (Tukey,  $p \geq 0,05$ ).

Verifica-se (Tabela 37), que a severidade do ambiente de secagem submetido às madeiras de teca, para as retrações em largura e comprimento (2,37; 2,47% e 4,07; 4,31%), respectivamente para os potenciais de secagem de 3,4 e 4,4, não apresentaram diferença estatística entre si, ao nível de 95% de confiabilidade. As retrações em espessura das tábuas, diferiram-se estatisticamente entre o ambiente de secagem (1,64 e 1,82%), respectivamente para os potenciais de secagem de 3,4 e 4,4. Tal diferença observada pode estar relacionada à maior quantidade de tábuas radiais, conseqüentemente, ocorrem nestas tábuas maiores retrações em espessura, em função, da disposição dos anéis de crescimentos estarem dispostos nas espessuras das tábuas.

#### 4.1.4 Umidade final, gradiente de umidade e tensões de secagem

Analisando o teor de umidade final das madeiras (Figura 37), após as secagens, nota-se que os programas elaborados, independentes das velocidades de circulação do ar utilizadas abaixo do PSF da madeira, foram elaborados com teor de

umidade final das madeiras em 10%. Não foi observado este valor de umidade final em nenhum programa de secagem avaliado. O programa que mais se aproximou do teor de umidade final desejado, foi o programa 6 (11,83%), em que se utilizou potencial de secagem de 4,4 e velocidade de circulação ao ar 3,5 m.s<sup>-1</sup> abaixo do PSF.

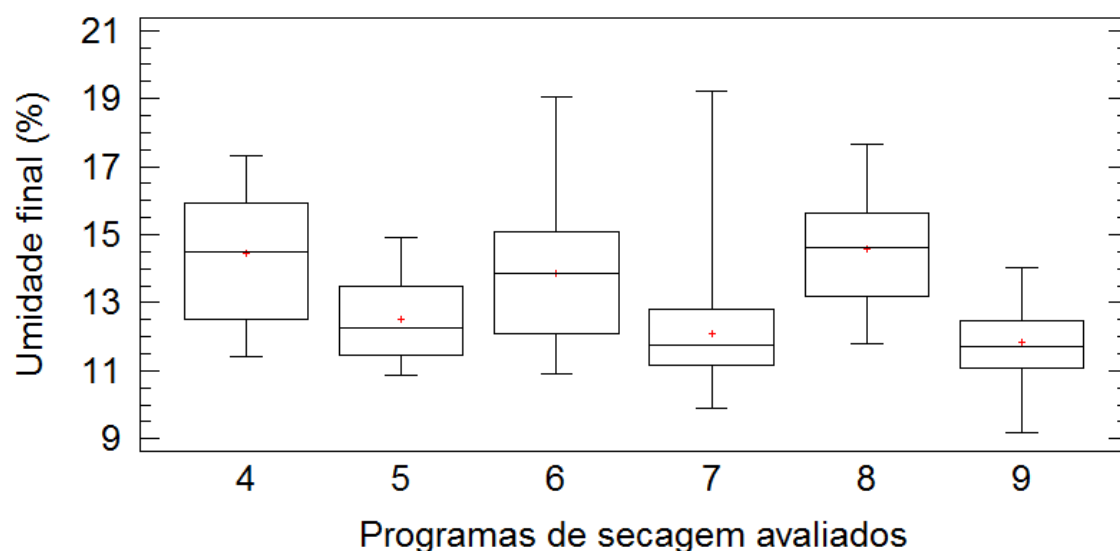


FIGURA 35 - Umidade final das madeiras de teca (*Tectona grandis*) submetida à secagem em câmara convencional de secagem

Observa-se (Tabela 38) que o teor de umidade final das madeiras de teca dentro de cada potencial de secagem empregado (3,4 ou 4,4) as velocidades de circulação do ar abaixo do PSF (2,5; 1,5 e 3,5 m.s<sup>-1</sup>) não diferiram-se estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey. Sendo que às madeiras secas pelos programas cujo potencial de secagem de 3,4, tiveram umidades finais de 14,08; 12,32 e 13,89%, respectivamente para as velocidades de circulação do ar abaixo do PSF de 2,5; 1,5 e 3,5 m.s<sup>-1</sup>. Enquanto às madeiras de teca secas pelos programas em que o potencial de secagem utilizado foi de 4,4, tiveram umidades finais de 12,07; 14,58 e 11,53%, respectivamente para as velocidades de circulação do ar abaixo do PSF de 2,5; 1,5 e 3,5 m.s<sup>-1</sup>.

Avaliando a influência do potencial de secagem no teor de umidade final das madeiras de teca, nota-se diferenças estatísticas ao nível de 95% de confiabilidade pelo teste de Tukey em cada velocidade de circulação do ar empregada abaixo do PSF das madeiras.

A justificativa pelo aumento das umidades finais em todos os programas de secagem avaliados pode ter sido a forma em que foi conduzida a etapa de condicionamento das madeiras, utilizando-se umidade de equilíbrio superior à umidade desejada para a finalização da secagem, assim como, o tempo de condicionamento adotado (seis horas). A programação da etapa de condicionamento das madeiras, seguiram as recomendações dos principais manuais de secagem de madeiras em câmaras convencionais de secagem.

TABELA 37 - RETRAÇÃO DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*) EM LARGURA, ESPESSURA, COMPRIMENTO E VOLUMÉTRICO EM FUNÇÃO DOS POTENCIAIS DE SECAGEM EMPREGADOS

Potencial de secagem	Umidade final (%)			
	Velocidade circulação ar (m.s <sup>-1</sup> )			
	2,5	1,5	3,5	F
3,4	14,08 aA (2,08; 14,74)	12,32 aB (1,71; 13,86)	13,89 aA (2,06; 14,87)	28,46**
4,4	12,07 bB (1,85; 15,29)	14,58 bA (1,96; 13,26)	11,83 bB (1,24; 10,44)	
Potencial de secagem	Gradiente de umidade 1 (%)			
	Velocidade circulação ar (m.s <sup>-1</sup> )			
	2,5	1,5	3,5	F
3,4	2,07 aA (0,93)(44,80)	1,57 aA (1,17)(74,37)	2,03 aA (1,42)(70,24)	6,96**
4,4	1,25 bB (1,35)(107,30)	2,60 bA (1,90)(73,34)	1,41 bB (1,36)(95,85)	
Potencial de secagem	Gradiente de umidade 2 (%)			
	Velocidade circulação ar (m.s <sup>-1</sup> )			
	2,5	1,5	3,5	F
3,4	2,34 aAB (1,72)(73,26)	1,44 aB (1,18)(81,64)	2,48 aA (1,61)(64,81)	7,86**
4,4	1,38 bB (1,47)(106,40)	2,49 bA (1,54)(61,87)	1,66 bAB (0,96)(57,80)	

Nota: Médias seguidas pela mesma letra minúscula (vertical) e maiúscula (horizontal) não diferem estatisticamente entre si (Tukey,  $p \geq 0,05$ ). Valores entre parêntesis correspondem ao desvio padrão e coeficiente de variação, respectivamente.

Assim como, o observado para o teor de umidade final das madeiras de teca, nota-se a mesma tendência para o gradiente de umidade das tábuas (Tabela 38),

sendo que, para o mesmo potencial de secagem utilizado (3,4 ou 4,4) as velocidades de circulação do ar abaixo do PSF (2,5; 1,5 e 3,5 m.s<sup>-1</sup>) não diferiram-se estatisticamente entre si. As madeiras secas pelos programas cujo potencial de secagem utilizado foi de 3,4, tiveram gradientes de umidade de 2,07 e 2,34; 157 e 1,44; 2,03 e 2,48%, respectivamente para as velocidades de circulação do ar abaixo do PSF de 2,5; 1,5 e 3,5 m.s<sup>-1</sup>, conforme a Figura 38.

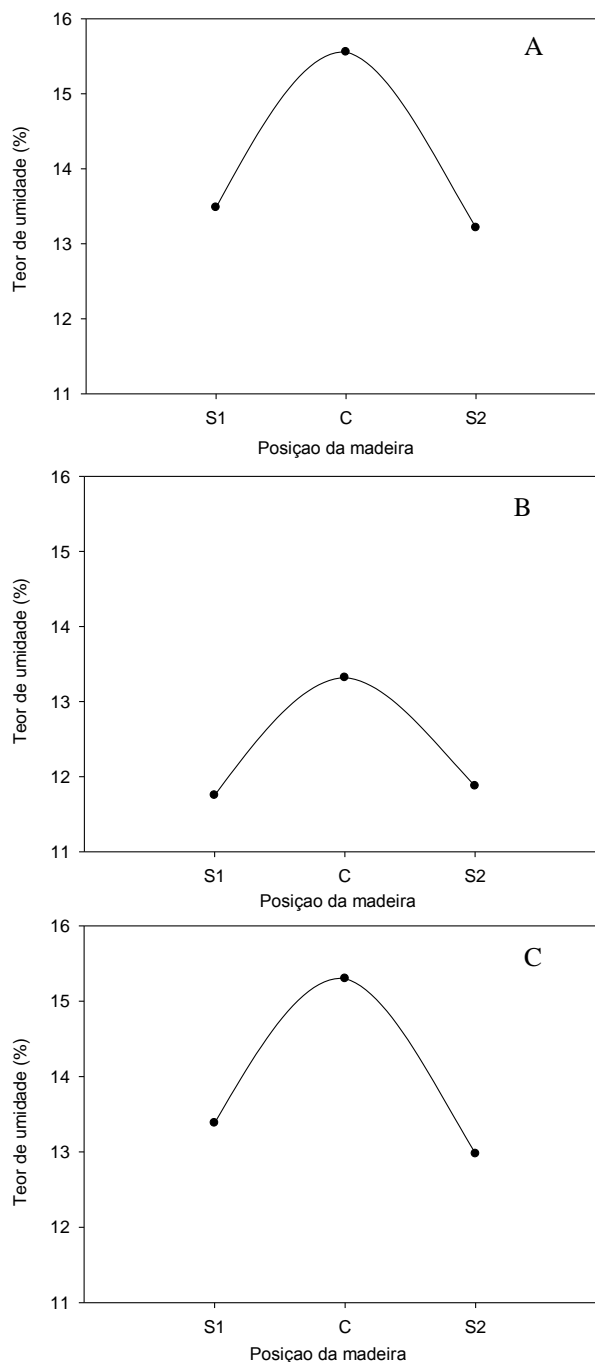


FIGURA 36 - Teor de umidade das superfícies (S1 e S2) e na região central da madeira de teca (*Tectona grandis*) após a secagem pelos programas 4 (A), 5 (B), 6 (C)

As madeiras de teca secas pelos programas em que o potencial de secagem utilizado foi de 4,4, tiveram umidades finais de 1,25 e 1,38; 2,60 e 2,49; 1,41; 1,66%, respectivamente para as velocidades de circulação do ar abaixo do PSF de 2,5; 1,5 e 3,5 m.s<sup>-1</sup>. O maior potencial de secagem empregado (4,4) aliado à menor velocidade de remoção do vapor de água na superfície das tábuas tiveram os maiores gradientes de umidades entre as regiões contíguas das madeiras (Figura 39).

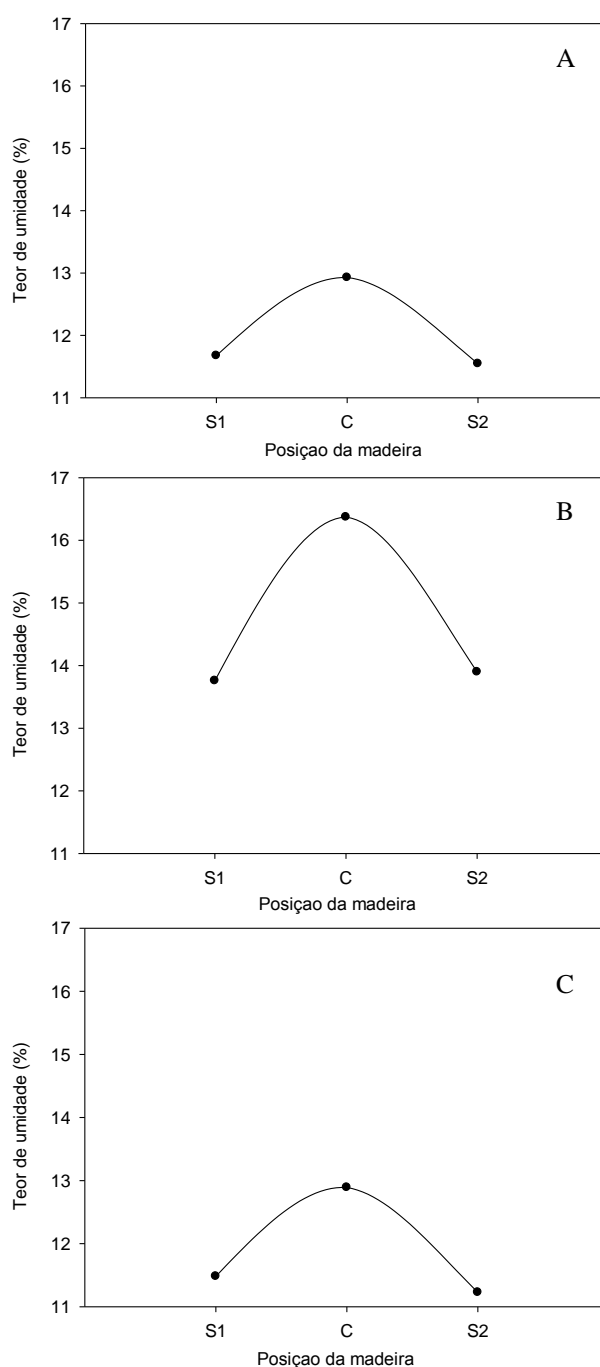


FIGURA 37 - Teor de umidade das superfícies (S1 e S2) e na região central da madeira de teca (*Tectona grandis*) após a secagem pelos programas 7 (A), 8 (B), 9 (C)



Para as tensões de secagem, foi verificado a presença e ausência do tensionamento nas amostras avaliadas. Quando detectado a presença, as amostras tensionadas foram classificadas de duas formas distintas (suave e forte), sendo a tomada de decisão para a classificação de forte foi determinado quando as extremidades das amostras se tocavam.

O gradiente de umidade formado nas madeiras está diretamente relacionado com a presença de tensões de secagem (Tabela 39), no qual quanto maior o gradiente, maior a incidência tensões de secagem nas madeiras de teca (*Tectona grandis*).

TABELA 38 - TENSÕES DE SECAGEM PARA A MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*) PARA OS DIFERENTES PROGRAMAS DE SECAGEM AVALIADOS

Programas secagem	Potencial de secagem	Tensões de secagem (%)		
		Ausência	Suave	Forte
Programa 4	3,4	42,31	42,31	15,38
Programa 5		57,69	30,77	11,54
Programa 6		7,41	37,04	55,56
Programa 7	4,4	7,69	42,31	50,00
Programa 8		11,54	50,00	38,46
Programa 9		32,00	24,00	44,00

Observa-se (Tabela 39), que as madeiras secas pelos programas de secagem elaborados cujo potencial de secagem empregado foi de 3,4, tiveram as menores incidências de tensões de secagem (42,31; 57,69 e 7,41%), respectivamente para os programas 4; 5 e 6. Para o programa elaborado onde a velocidade de circulação do ar abaixo do PSF foi de  $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ , as madeiras de teca tiveram as menores incidências de tensões de secagem classificadas como forte (11,54%), enquanto às madeiras secas pelo programa com velocidade de circulação do ar abaixo do PSF em  $3,5 \text{ m.s}^{-1}$ , as madeiras de teca tiveram as maiores incidências de tensões de secagem classificadas como forte.

Avaliando as tensões de secagem para as madeiras secas pelos programas 7; 8 e 9, sendo em tais programas o potencial de secagem empregado foi de 4,4, a menor velocidade de circulação do ar utilizada abaixo do PSF ( $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ ) as madeiras de teca tiveram as menores porcentagens de tensões de secagem acentuadas (forte), sendo de 38,46%. Já as madeiras secas pelos programas 7 e 9

(velocidade de circulação do ar abaixo do PSF de 2,5 e 3,5 m.s<sup>-1</sup>) tiveram incidências de tensões de secagem classificadas como forte de 50,00 e 44,00%, respectivamente.

Observa-se que o aumento do potencial de secagem proporcionou as maiores porcentagens de tábuas tensionadas ao final da secagem das madeiras, sendo que as tensões de secagem resultam em tábuas sob forças de compressão nas superfícies, enquanto, a região central sob forças de tração, em função do fluxo de fluidos ocorrido entre as regiões contíguas da madeira. O alívio das tensões de secagem, pode ser minimizado com a etapa de condicionamento das madeiras, em que se eleva a umidade relativa do ambiente de secagem por um determinado tempo. Neste estudo esta etapa foi de 6 horas, sendo tal tempo considerado inadequado à medida em que torna-se o ambiente de secagem mais severo, potenciais de secagem elevados, necessita de maiores tempos para o condicionamento da madeira. O tempo utilizado nesta pesquisa seguiu as recomendações dos principais manuais de secagem disponíveis na literatura.

Outro fato ligado ao gradiente de umidade e as tensões de secagem é que ambas se correlacionaram diretamente com os defeitos de secagem, no qual quanto maior o gradiente de umidade, mais tensionadas está a madeira, conseqüentemente, maiores os índices de defeitos.

#### **4.1.5 Defeitos de secagem**

##### **4.1.5.1 Rachaduras de topo e de superfície**

O incremento do potencial de secagem para a secagem das madeiras de teca (*Tectona grandis*) com diferentes velocidades de circulação do ar entre as pilhas de madeiras abaixo do PSF, não proporcionaram rachaduras de topo, assim como, rachaduras de superfície nas madeiras.

Apesar do aumento dos gradientes de umidades entre as regiões contíguas da madeira, sendo que as rachaduras provenientes da secagem decorrem em função da formação destes gradientes, tornando-se as extremidades das tábuas sob forças de tração, enquanto às camadas mais úmidas, sob forças de compressão. Estas diferenças de forças exercidas entre as camadas contíguas da madeira, ocasionam o rompimento celular, conseqüentemente a formação das rachaduras.

A espécie em estudo, apresenta um comportamento na secagem mesmo tendo um ambiente de secagem mais severo, de forma satisfatória, o que pode ser comprovado pelos resultados obtidos no Capítulo 1 (Elaboração de programas de secagem para madeiras de teca *Tectona grandis* L. f.), no item 4.2.4 (Retração tangencial, radial, axial e volumétrica da madeira na secagem drástica a 100°C), em que as madeiras foram expostas à temperatura de 100 °C e não sendo verificado a incidência de rachaduras.

Concomitantemente, dever ser considerado que as madeiras de teca (*Tectona grandis*), apresentam grã retilínea, o que segundo Klitzke (2007), madeiras com fibras paralelas ao eixo de orientação, seu comportamento durante a secagem reduz significativamente a presença de defeitos de rachaduras e empenamentos. Pode-se enfatizar no entanto, as observações de Galvão; Jankowsky (1985) no qual, afirmaram, que as rachaduras aparecem como consequências da diferença de contração nas direções radial e tangencial da madeira e de diferenças de umidade entre regiões contíguas de uma peça, durante o processo de secagem.

Os diferentes programas de secagem avaliados, foram adequadamente elaborados para esta variável (surgimento de rachaduras), sendo que, uma das maiores dificuldades durante a secagem de madeiras é a elaboração de curvas de secagem que proporcionem a otimização dos tempos de secagem, assim como, atendam a qualidade do produto a ser manufaturado.

#### **4.4.4.2 Arqueamento**

Observa-se (Figura 40), que as madeiras secas pelos programas de secagem elaborados onde o potencial de secagem empregado foi de 3,4, tiveram as maiores incidências de arqueamento nas tabuas (0,76; 0,61 e 0,85 m.mm<sup>-1</sup>), respectivamente para os programas 4; 5 e 6. Sendo que para o programa elaborado cujo a velocidade de circulação do ar abaixo do PSF foi de 1,5 m.s<sup>-1</sup> (programa 5), as madeiras de teca tiveram as menores incidências desse tipo de defeito (0,61 m.mm<sup>-1</sup>), enquanto às madeiras secas pelo programa com velocidade de circulação do ar abaixo do PSF em 3,5 m.s<sup>-1</sup> (programa 6), as madeiras de teca tiveram as maiores incidências de arqueamento (0,61 m.mm<sup>-1</sup>).

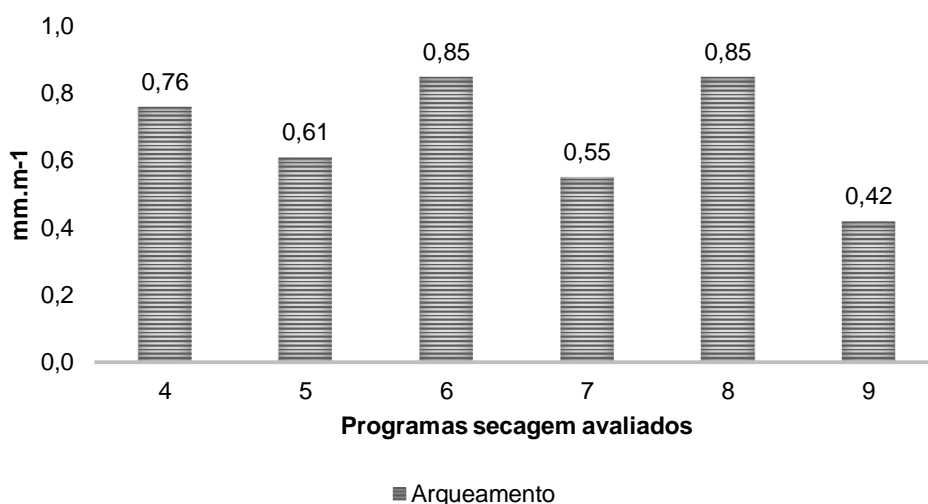


FIGURA 38 - Arqueamento das madeiras de teca (*Tectona grandis*) para os diferentes programas de secagem avaliados

Já as madeiras secas pelos programas de secagem elaborados onde o potencial de secagem empregado foi de 4,4, nota-se que a incidência do arqueamento nas tábuas foi inferior (0,55; 0,85 e 0,42 m.mm<sup>-1</sup>, respectivamente para os programas 4; 5 e 6) aos observados nas madeiras secas pelos programas em que foi utilizado potencial de secagem de 3,4. Não sendo observado uma relação proporcional entre a velocidade de circulação do ar entre as pilhas de madeira abaixo do PSF com a incidência do defeito do tipo arqueamento, em que a menor velocidade de circulação do ar abaixo do PSF empregada (1,5 m.s<sup>-1</sup>), as tábuas tiveram as maiores incidências de arqueamento (0,85 m.mm<sup>-1</sup>), enquanto à maior velocidade empregada, as tábuas tiveram índice de arqueamento de (0,42 m.mm<sup>-1</sup>).

Conforme a NBR 14806 (2002), há uma tolerância para a flecha do arqueamento em madeiras de folhosas de até 5 mm.m<sup>-1</sup>, no entanto, o maior índice de arqueamento verificado neste estudo foi de 0,85 mm.m<sup>-1</sup>, valor este, 83% menor que o limite de tolerância indicado pela norma, o que podemos concluir que 100% das tábuas submetidas ao à secagem deste trabalho estão aptas ao processo de manufatura.

Em função do arqueamento ser caracterizado pela curvatura ao longo do comprimento da tábua em sua extremidade (MARTINS, 1988), o qual é originário pela diferença de retração longitudinal entre as porções laterais da tábua, podendo ser causado pela diferença de lenhos (juvenil e adulto) na mesma peça, tornando mais susceptível ao desenvolvimento deste defeito no processo de remoção de

umidade da madeira, visto que os mesmos apresentam comportamentos distintos quanto a contrações durante a secagem (SUSIN, 2012).

Lima (2005) ainda enfatizou que o arqueamento pode ser minimizado durante a secagem, tendo-se procedimentos adequados desde o momento de desdobro das toras, no qual, toras que apresentam assimetria de medula, deve tomar cuidados com o posicionamento correto das toras no carro porta toras.

Existem na literatura alguns trabalhos referentes a secagem de madeiras em que não foi verificado a ocorrência de arqueamento nas madeiras avaliadas, como o de Andrade (2000), em que se elaborou programas de secagem para madeiras de Freijó (*Cordia goeldiana* Huber), Jutaí-cica (*Martiodendron elatum* Ducke) e Peroba-mica (*Aspidosperma* sp.), onde não foi constatado a presença de arqueamento para estas espécies.

#### 4.4.4.3 Encurvamento

Observa-se (Figura 41), que as madeiras secas pelos programas de secagem elaborados onde o potencial de secagem empregado foi de 3,4, tiveram as maiores incidências de encurvamento nas tábuas (0,85; 0,55 e 1,21 m.mm<sup>-1</sup>), respectivamente para os programas 4; 5 e 6. Para o programa elaborado onde a velocidade de circulação do ar abaixo do PSF foi de 1,5 m.s<sup>-1</sup> (programa 5), as madeiras de teca tiveram as menores incidências desse tipo de defeito (0,55 m.mm<sup>-1</sup>), enquanto às madeiras secas pelo programa com velocidade de circulação do ar abaixo do PSF em 3,5 m.s<sup>-1</sup> (programa 6), as madeiras de teca tiveram as maiores incidências de encurvamento (1,21 m.mm<sup>-1</sup>).

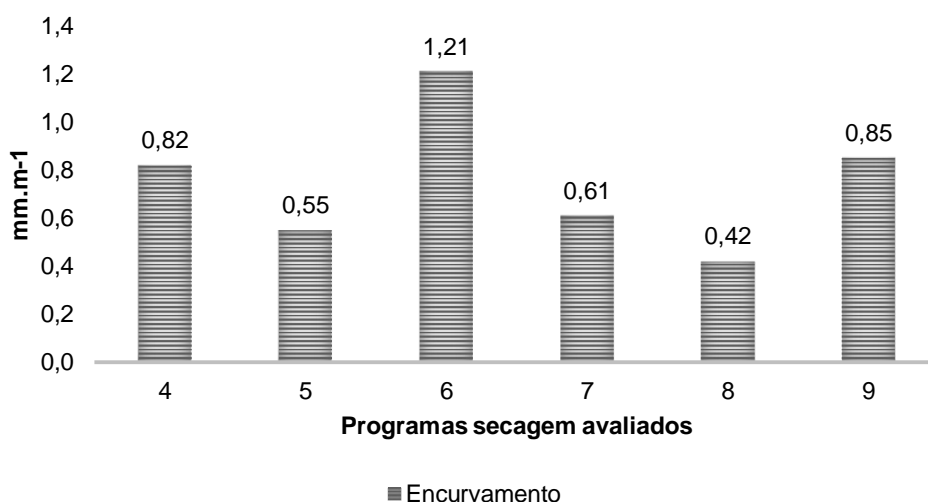


FIGURA 39 - Encurvamento das madeiras de teca (*Tectona grandis*) para os diferentes programas de secagem avaliados

As madeiras secas pelos programas de secagem elaborados onde o potencial de secagem empregado foi de 4,4, nota-se que a incidência do arqueamento nas tábuas foi inferior (0,61; 0,42 e 0,85 m.mm<sup>-1</sup>, respectivamente para os programas 7; 8 e 9) em comparação ao arqueamento observado nas madeiras secas pelos programas com potencial de secagem de 3,4.

Assim como, verificado para as madeiras de teca secas pelos programas cujo potencial de secagem empregado foi de 3,4, o encurvamento, possuem relação proporcional com a velocidade de circulação do ar entre as pilhas de madeiras abaixo do PSF. Em que a menor velocidade de circulação do ar (1,5 m.s<sup>-1</sup>) abaixo do PSF, as tábuas de teca tiveram índice de encurvamento de 0,42 m.mm<sup>-1</sup>, enquanto, para a maior velocidade de circulação do ar abaixo do PSF (1,5 m.s<sup>-1</sup>) nota-se o incremento do índice de encurvamento em 50,58%.

Conforme a NBR 14806 (2002), há uma tolerância para a flecha do encurvamento em madeiras de folhosas de até 5 mm.m<sup>-1</sup>. No entanto, nota-se que as tábuas secas pelo programa 6, tiveram os maiores índices de encurvamento (1,21 mm.m<sup>-1</sup>), no entanto, inferior há tolerância estabelecida pela norma.

Brandão (1989) relatou que o encurvamento ocorre em função das diferentes retrações que ocorrem na madeira em razão da secagem mais acelerada em uma face frente à outra. A presença de lenhos anormais, assim como, tábuas favorecem o encurvamento da madeira. Simpson (1991) e Denig et al. (2000) ainda relataram que o encurvamento não é um dos defeitos mais problemáticos na madeira, visto

que o mesmo pode ser eliminado realizando o correto empilhamento das madeiras nas pilhas para a secagem. Sendo que o encurvamento é influenciado mais pelo empilhamento em si do que propriamente pelo processo de secagem (KLITZKE, 2007).

A utilização de cargas adicionais sobre as pilhas, assim como, a colocação das tábuas que apresentam encurvamento nas primeiras camadas de madeiras, favorecem a minimização da ocorrência deste defeito ao fim do processo de secagem (BEKELE, 1995; CINIGLIO, 1998, KLITZKE, 2007; SUSIN, 2012).

#### **4.4.4.4 Encanoamento**

As madeiras de teca (*Tectona grandis*) não apresentaram flecha de encanoamento, de forma que caracterize a ocorrência deste defeito oriundo do processo de secagem. Observações semelhantes foram verificadas nas amostras submetidas à secagem drástica a 100°C (Capítulo 1 - Elaboração de programas de secagem para madeiras de teca *Tectona grandis* L. f.), sendo, portanto, uma característica intrínseca da espécie à tolerância a ambientes de secagem mais severos.

#### **4.4.4.5 Colapso**

Para o colapso, as madeiras de teca, não apresentaram susceptibilidade para a manifestação deste defeito, dentre os diferentes programas de secagem avaliados, mesmas observações realizadas por Salas; Moya (2014), que também não encontraram a manifestação de tal defeito em seus estudos, assim como, resultados obtidos nos Capítulos 1 e 2 deste estudo.

### **4.5 Consumo de energia elétrica na secagem das madeiras**

O consumo de energia elétrica despendida pelo ventilador da câmara convencional piloto, refere-se há um volume de madeira seca por carga (programa de secagem avaliado) de 0,0825 m<sup>3</sup>.

Na Figura 42, consta o consumo de energia elétrica pelo ventilador na secagem das madeiras de teca (*Tectona grandis*) para a remoção de cada tipo de

água. Os programas de secagem, os quais, tiveram potencial de secagem empregado de 3,4, ressalta-se que para a remoção da água capilar (verde até 28% de umidade), a velocidade de circulação do ar, foi a mesma em todos os programas avaliados ( $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ ).

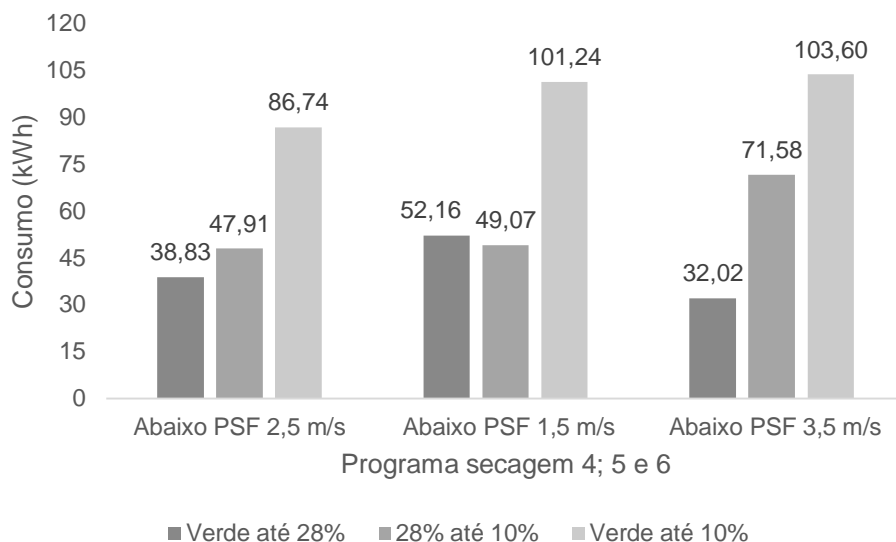


FIGURA 40 - Consumo de energia elétrica pelo ventilador em cada fase da secagem para a madeira de teca (*Tectona grandis*) para os programas 4; 5 e 6

Nesta fase da secagem os programas de secagem 4; 5 e 6 tiveram consumo de energia elétrica pelo ventilador de 38,83; 52,16 e 32,02 kWh, respectivamente). Sendo o menor consumo de energia observado para a remoção da água capilar das madeiras pertencentes ao programa 6. Pode ser justificado pela maior taxa de secagem que as madeiras tiveram ( $6,5787 \%U.h^{-1}$ ), como discutido no item 4.1.2 – Taxa de secagem, deste mesmo capítulo. Em função desta maior taxa de secagem, o tempo para a remoção da água capilar foi menor, consequentemente, menor o consumo de energia elétrica.

Klitzke (2002) ao avaliar o consumo de energia elétrica para madeira de Pinus encontrou consumo de 18 a 32 kWh para a remoção da água capilar, dependendo da temperatura de secagem utilizada. Sendo que para maiores temperaturas, menor o consumo de energia.

Para o consumo de energia para retirada da água higroscópica da madeira, observa-se que mantendo a velocidade de circulação do ar abaixo do PSF em  $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ , foi obtido o menor consumo de energia para as madeiras de teca (47,91 kWh).



Enquanto, a redução da velocidade de circulação do ar abaixo do PSF para  $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ , foi obtido o consumo de 49,07 kWh e o aumento da velocidade para  $3,5 \text{ m.s}^{-1}$ , o consumo de energia despendido pelo ventilador foi de 71,58 kWh.

Nota-se que o aumento da velocidade de circulação do ar abaixo do PSF, em 40%, o consumo de energia pelo ventilador foi 19,44% superior, em comparação com a velocidade de circulação do ar constante em  $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ .

Avaliando o consumo de energia pelo ventilador em todo o ciclo de secagem das madeiras de teca, os programas que tiveram alterações na velocidade de circulação do ar abaixo do PSF (programas 5 e 6), tiveram os maiores consumos de energia pelo ventilador ao final do ciclo (101,24 e 103,60 kWh, respectivamente), enquanto o consumo de energia para o programa em que foi constante a velocidade de circulação do ar em  $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ , o consumo de energia foi de 84,74 kWh.

Para o programa 5, em que a velocidade de circulação do ar abaixo do PSF foi reduzida para  $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ , o consumo total superior ao final do ciclo de secagem, está relacionado ao tempo decorrido para a remoção da água capilar (45,42 horas), pelo fato da menor taxa de secagem observada nesta fase da secagem. Outro fato relevante, foi o maior tempo também observado para a remoção da água de difusão (49,07 horas).

O tempo para a remoção da água de difusão para as madeiras secas pelo programa 5, foi 45,11% superior que o tempo demandado para a remoção desta mesma água, mantendo-se a velocidade de circulação do ar em  $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ , sendo a redução da velocidade em 40% (Tabela 40).

Avaliando o consumo de energia nominal ( $\text{kWh.h}^{-1}$ ), observa-se que a redução da velocidade de circulação do ar para  $1,5 \text{ m.s}^{-1}$  abaixo do PSF, obteve o menor consumo nominal de energia ( $1,08 \text{ kWh.h}^{-1}$ ), no entanto, o tempo demandado para a remoção da água de difusão é superior, o que resulta no final do ciclo de secagem maior consumo de energia pelo ventilador. Já as velocidades de  $2,5$  e  $3,5 \text{ m.s}^{-1}$ , os consumos de energia nominal são de  $1,53$  e  $2,78 \text{ kWh.h}^{-1}$ , respectivamente), este maior consumo nominal de energia, justifica o maior consumo de energia ao final da secagem, proporcionado pelo aumento da velocidade de circulação do ar abaixo do PSF.

TABELA 39 - TEMPO DE SECAGEM E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA PELO VENTILADOR PARA A SECAGEM DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*) EM FUNÇÃO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM AVALIADOS COM POTENCIAL DE SECAGEM DE 3,4 SUBMETIDA À SECAGEM EM CÂMARA CONVENCIONAL

Programas de secagem avaliados	Intervalo de umidade (%)	Tempo de secagem (horas)	Consumo de energia elétrica ventilador (kWh)	Consumo de energia elétrica ventilador (kWh.h <sup>-1</sup> )
Programa 4	Verde até 28%	25,37	38,83	1,53
	28% até 10%	31,30	47,91	1,53
	Verde até 10%	56,67	86,74	1,53
Programa 5	Verde até 28%	34,08	52,16	1,53
	28% até 10%	45,42	49,07	1,08
	Verde até 10%	79,50	101,24	1,27
Programa 6	Verde até 28%	20,92	32,02	1,53
	28% até 10%	25,75	71,58	2,78
	Verde até 10%	46,67	103,60	2,22

Severo (1989) ressalta que o consumo de energia em kWh para a remoção de um quilograma de água evaporada é em torno de 2 a 4 kWh.kg<sup>-1</sup> em secagem convencional.

A literatura, no qual, relata que a velocidade de circulação do ar, não tem influência sobre a taxa de secagem da madeira abaixo do PSF, em função, de como ocorre a translocação de fluidos da água higroscópica na madeira, o qual se dá pelo fenômeno físico de difusão, sendo a temperatura um fator que influencia no mecanismo de translocação de fluidos para esta faixa de umidade (KOLLMANN; SHENEIDER, 1961; TOMASELLI, 1977; SEVERO, 1989; WENGERT; DENIG, 1995; KLITZKE, 2002).

Severo (1989) ainda complementa que a velocidade de circulação do ar exerce influência significativa sobre a taxa de secagem a processos conduzidos em altas temperaturas, pois na secagem convencional, o efeito da velocidade de circulação do ar decresce rapidamente a teores de umidades abaixo ao PSF, sendo que em secagens conduzidas à alta temperatura este efeito ainda é pronunciado a umidades abaixo do PSF. O fenômeno físico da evaporação da água e o seu movimento interno até a superfície da madeira mudam durante todo o ciclo de secagem da madeira. Klitzke (2002) enfatiza que esta alteração afeta a relação da velocidade de circulação do ar entre as pilhas de madeira e a eficiência do processo

de secagem, sendo que para cada fase da secagem existe uma velocidade de circulação do ar ótima.

Na Figura 43, consta o consumo de energia elétrica pelo ventilador na secagem das madeiras de teca (*Tectona grandis*) para a remoção de cada tipo de água. Os programas de secagem, os quais, tiveram potencial de secagem empregado de 4,4, ressalta-se que para a remoção da água capilar (verde até 28% de umidade), a velocidade de circulação do ar, foi a mesma em todos os programas avaliados ( $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ ).

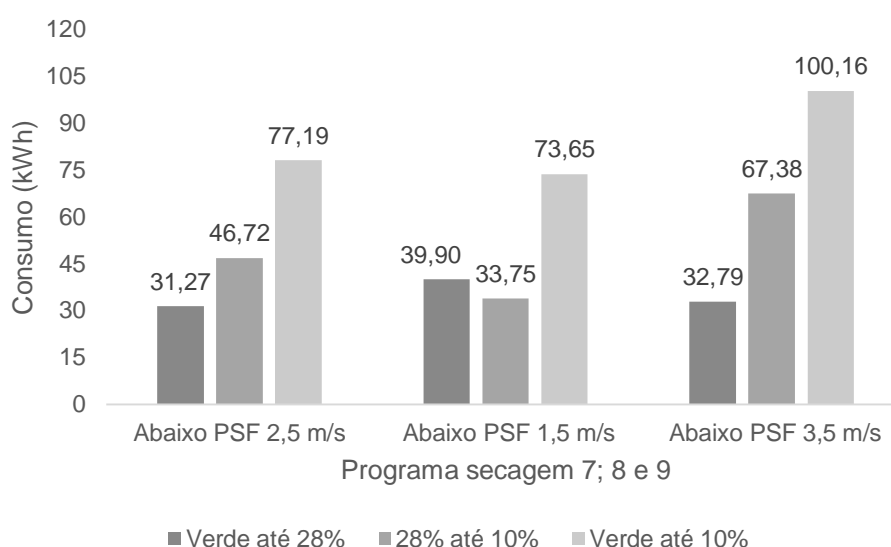


FIGURA 41 - Consumo de energia elétrica pelo ventilador em cada fase da secagem para a madeira de teca (*Tectona grandis*) para os programas 7; 8 e 9

O consumo de energia para a remoção da água capilar foi de 31,27; 39,90 e 32,79 kWh, respectivamente para os programas 7; 8 e 9. O maior consumo de energia observado para a remoção da água capilar das madeiras pertencentes ao programa 8 se justifica pela menor taxa de secagem que as madeiras tiveram ( $7,4898 \text{ \%U.h}^{-1}$ ), como discutido no item 4.1.2 – Taxa de secagem, deste mesmo capítulo. Em função desta menor taxa de secagem, o tempo para a remoção da água capilar foi maior, consequentemente, maior o consumo de energia elétrica.

Estas diferenças entre os consumos, referem-se às diferenças entre as taxas de secagem da madeira, sendo que as madeiras de teca secas pelo programa 7, tiveram taxa de secagem de  $9,3718 \text{ \%U.h}^{-1}$ , enquanto as madeira de teca secas

pelos programas 8 e 9 tiveram taxas de secagem de 7,4898 e 9,5916 %U.h<sup>-1</sup>, respectivamente, onde ressalta-se que o consumo de energia pelo ventilador está diretamente relacionado com o tempo demandado, consequentemente, com a taxa de secagem da madeira para o intervalo de umidade.

Para o consumo de energia para retirada da água higroscópica da madeira, observa-se que a redução da velocidade de circulação do ar entre as pilhas de madeira abaixo do PSF (1,5 m.s<sup>-1</sup>), proporcionou o menor consumo de energia para as madeiras de teca (33,75 kWh).

Mantendo-se a velocidade de circulação do ar constante ao longo de todo o ciclo de secagem o consumo de energia elétrica pelo ventilador foi de 46,72 kWh e o aumento da velocidade para 3,5 m.s<sup>-1</sup>, o consumo de energia despendido pelo ventilador foi de 67,38 kWh, como demonstrado na Tabela 41.

Avaliando o consumo de energia do ventilador em todo o ciclo da secagem das madeiras de teca, nota-se que a redução da velocidade de circulação do ar abaixo do PSF (programa 8) de fato proporcionou o menor consumo de energia pelo ventilador no processo de secagem (73,65 kWh), sendo esta redução de 6% em comparação com o consumo de energia pelo ventilador para a secagem em que não foi realizada alterações na velocidade de circulação do ar abaixo do PSF (programa 7).

O aumento da velocidade de circulação do ar abaixo do PSF, proporcionou o aumento do consumo de energia, em 28%, em comparação com o consumo de energia pelo ventilador para a secagem em que não foi realizada alterações na velocidade de circulação do ar abaixo do PSF (programa 7), como demonstrado na Tabela 41.

Avaliando o consumo de energia nominal (kWh.h<sup>-1</sup>), observa-se que a redução da velocidade de circulação do ar para 1,5 m.s<sup>-1</sup> abaixo do PSF, obteve o menor consumo nominal de energia (1,08 kWh.h<sup>-1</sup>), no entanto, o tempo demandado para a remoção da água de difusão é superior, o que resulta no final do ciclo de secagem maior consumo de energia pelo ventilador. Já as velocidades de 2,5 e 3,5 m.s<sup>-1</sup>, os consumos de energia nominal foram (1,52 e 2,73 kWh.h<sup>-1</sup>, respectivamente.

TABELA 40 - TEMPO DE SECAGEM E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA PELO VENTILADOR PARA A SECAGEM DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*) EM FUNÇÃO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM AVALIADOS COM POTENCIAL DE SECAGEM DE 4,4 SUBMETIDA À SECAGEM EM CÂMARA CONVENCIONAL.

Programas de secagem avaliados	Intervalo de umidade (%)	Tempo de secagem (horas)	Consumo de energia elétrica ventilador (kWh)	Consumo de energia elétrica ventilador (kWh.h <sup>-1</sup> )
Programa 7	Verde até 28%	20,58	31,27	1,52
	28% até 10%	31,75	46,72	1,52
	Verde até 10%	51,33	77,99	1,52
Programa 8	Verde até 28%	26,26	39,39	1,52
	28% até 10%	31,24	33,75	1,08
	Verde até 10%	57,50	73,65	1,28
Programa 9	Verde até 28%	21,58	32,79	1,52
	28% até 10%	24,67	67,38	2,73
	Verde até 10%	46,25	100,16	2,17

Os resultados encontrados para a secagem das madeiras de teca (*Tectona grandis*) em que se utilizou os maiores potenciais de secagem (4,4), estão de acordo com os descritos na literatura (KOLLMANN; SHENEIDER, 1961; TOMASELLI, 1977; SEVERO, 1989; KLITZKE, 2002), sendo assim, enfatizado as observações dos autores citados em seus estudos que a velocidade de circulação do ar abaixo do PSF, exerce influência de forma mais pronunciada a teores de umidades acima do PSF.

Na Tabela 42, consta os modelos matemáticos ajustados para estimar o consumo de energia elétrica pelo ventilador para a secagem da madeira de teca (*Tectona grandis*) em função do teor de umidade da madeira, assim como, da taxa de secagem. Os modelos foram ajustados em função às estas duas variáveis (umidade e taxa de secagem), pelo fato de ambas afetarem diretamente o tempo de secagem.

TABELA 41 - MODELOS MATEMÁTICOS AJUSTADO PARA ESTIMAR O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA PELO VENTILADOR PARA SECAGEM DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*) EM CÂMARA CONVENCIONAL DE SECAGEM.

Programas secagem avaliados	Potencial de secagem	Modelos ajustados	$R_{aj}^2$ (%)	$S_{yx}$ (%)	F
Programa 4		CE= 4198,4 – 0,575249 * Uimidade + 0,5865* Ts	97,40	0,48	1478,54**
Programa 5	3,4	CE= 12126,1 – 3,02436*Uimidade + 10,1303*Ts	92,91	8,56	6233,54**
Programa 6		CE= 8926,32 – 2,76884*Uimidade + 11,6245*Ts	89,88	10,16	2426,09**
Programa 7		CE= 83,2616 – 1,45954*Uimidade + 1,66326*Ts	93,77	6,22	5190,06**
Programa 8	4,4	CE= 63,2656 – 1,13858*Uimidade + 1,21195*Ts	96,87	2,98	8569,75**
Programa 9		CE= 131,494 – 4,88041 *Uimidade + 15,236*Ts	91,78	10,88	3433,21**

Nota: CE: consumo energia elétrica ventilador (kWh); Ts: taxa de secagem (%U.h<sup>-1</sup>);  $R_{aj}^2$ : coeficiente de determinação ajustado.  $S_{yx}$ : erro padrão da estimativa. F: fator de significância.

Observa-se que os modelos ajustados são equações lineares com duas variáveis ( $Y = a+b*X+c*Y$ ), em que, se obteve valores de coeficiente de determinação ajustado elevado, significativos ao nível de 1% e com um erro padrão da estimativa baixos. Porém, analisando o consumo de energia elétrica pelo ventilador de forma independente as variáveis correlacionadas (teor de umidade e taxa de secagem), ambas seguem tendências lineares.

O consumo de energia em função do tempo se torna linear, de forma proporcional, quanto maior o tempo maior o consumo de energia elétrica.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos para a secagem drástica da madeira de teca em câmara convencional no presente estudo permitem as seguintes conclusões:

- O aumento do potencial de secagem, proporcionou às madeiras de teca (*Tectona grandis*) maiores velocidades de secagem;
- A secagem severa das madeiras de teca, não inviabilizaram o emprego das tábuas para o processo de beneficiamento, pois não houve defeitos oriundos do processo de secagem, os quais, comprometessem a sua utilização para a manufatura em produtos sólidos de madeira;
- As alterações das velocidades de circulação do ar abaixo do PSF das madeiras de teca, alteraram os valores de taxa de secagem para a remoção da água higroscópica, no entanto, este aumento proporcionado na taxa de secagem não influencia de forma significativa a taxa de secagem geral da madeira;
- As alterações da velocidade de circulação do ar abaixo do PSF, proporcionaram alterações do consumo nominal de energia elétrica.

## 6. REFERENCIAS

ANDRADE, A. **Indicação de programas de secagem convencional de madeiras**. 2000. 72f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

ARRUDA, P. M. **Secagem da madeira juvenil de *Tectona grandis* L. F.** 2013. 98f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira), Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14806**. Madeira serrada de eucalipto - Requisitos. Rio de Janeiro. 2002. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9487**. Classificação de madeira serrada de folhosas. Rio de Janeiro. 1986. 32p.

BEKELE, T. Degradation of boards of *Eucalyptus globulus* Labill. and *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. during air drying. **Holz Roh Werkst**, v. 53 n. 6, p. 407-412, 1995.

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B. Influência da época de colheita da biomassa florestal sobre sua qualidade para a geração de energia. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, p. 619-628, 2010.

BRANDÃO, A. T. O. **Determinação de metodologia para a indicação de programas de secagem de madeiras**. 1989. 100f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

CINIGLIO, G. **Avaliação da secagem de madeira serrada de *E. grandis* e *E. urophylla***. 1998. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola



Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

COMISSÃO PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. **COPANT 462**. Método de determinación de la contracción. 1972. 8p.

DENIG, J.; WENGERT, E. M.; SIMPSON, W. T. **Drying hardwood lumber**. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–118. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2000. 138 p.

ELEOTÉRIO, R. J. **Modelagem e simulação do processo de secagem de madeiras serradas de espécies tropicais brasileiras**. 2009. 249f. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 111p.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e da massa**. Tradução e revisão técnica: Eduardo Mach Queiroz, Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 643 p.

JANKOWSKY, I. P. **Metodologia simplificada para a indicação de programas de secagem**. 2009. 112f. Tese (Livre docência em Ciência e Tecnologia da Madeira), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009.

KLITZKE, R. J. **Uso do inversor de frequência na secagem de madeiras**. 2002. 239f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

KLITZKE, R. J. Secagem da madeira. In: José Tarcísio da Silva Oliveira, Nilton César Fiedler, Marcelo Nogueira. (Org.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro**. Visconde do Rio Branco: Suprema Gráfica e Editora Ltda, 2007, v. 1, p. 271-366.

KLITZKE, R. J.; BATISTA, D. C. Ensaio de taxa de secagem e escore de defeitos para a predição da qualidade de secagem convencional da madeira de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, v. 38, n. 85, p. 97-105, 2010.

KOLLMANN, F. E. P.; CÔTE JUNIOR, W. A. **Principles of wood science and technology**. New York: Springer-Verlag, 1968. 592p.

KOLLMANN, F. F. P.; SHENEIDER, A. Der eiflub der stromungsgesshwin-digkeit aufdie heibdampftrockung von shnittholz. **Holz als Rohn-un Werkstoff**, v. 19, p. 461-478, 1961.

LIMA, I. L. **Influência do desbaste e da adubação na qualidade da madeira serrada de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden**. 2005. 137f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

LOIOLA, P. L. ; JUIZO, C. G. F. ; MARCHESAN, R. ; KLITZKE, R. J. ; ROCHA, M. P. Drying of wood from *Mimosa scabrella*, *Eucalyptus dunnii* and *Tectona grandis* in solar kiln, in south Brazil. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 9, p. 445-453, 2015.

MARTINS, V.A. **Secagem de madeira serrada**. Brasília: IBDF, 1988. 56p.

MELLADO, E. C. E. R. **Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de Pinus**. 2007. 155f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Text book of wood technology**. 4 ed. New York: MacGraw-Hill, 1980. 722 p.

SALAS, C.; MOYA, R. Kiln, solar and air drying behavior of lumber of *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* from Fast-grown plantations: moisture content, wood color, and drying defects. **Drying Technology: An International Journal**. London, v. 32, n. 3, p. 301-310. 2014.

SEVERO, E. T. D. **Efeito da temperatura e da velocidade do ar na secagem de madeira serrada de *Pinus elliottii***. 1989. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

SIAU, J. F. **Transport process in wood**. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 245 p.

SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual**. Madison: U.S. Department of Agriculture, 1991. 274 p.

SUSIN, F. **Avaliação de programas de secagem para madeiras de eucalipto elaborados com base em testes prévios a alta temperatura**. 2012. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

TOMASELLI, I. **Condições da Secagem Artificial de Madeiras Serradas no Paraná e Santa Catarina**. 1974. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1974.

TOMASELLI, I. **Effect of high temperature drying on properties of *Pinus radiata***. 1977. 264f. Tese (Doutorado em Wood Science), University of Melbourne, Melbourne. 1977.

WENGERT, E. M.; DENIG, J. Lumber drying – today and tomorrow. **Forest Products Journal**. Madison, v. 45, n. 5, p. 22 – 30, 1995.